

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Р. В. ПОДОЛЬСЬКИЙ, О. І. БАБАЧЕНКО, Г. А. КОНОНЕНКО,
Н. С. РОМАНОВА, А. О. САФРОНОВА, Е.С. КЛЕМЕШОВ

**ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ ТА ТЕРМІЧНІЙ
ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ**

Друкується за Планом видань навчальної та методичної літератури,
затвердженим Вченою радою ІПБТ УДУНТ
Протокол №1 від 24.01.2022

ЕЛЕКТРОННИЙ АНАЛОГ ДРУКОВАНОГО ВИДАННЯ

Дніпро 2022

Подольський Р. В., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А. та ін. Застосування спеціалізованого програмного забезпечення в матеріалознавстві та термічній обробці металів та сплавів : методичний посібник. – Дніпро : Україн. держ. ун-т науки і технол., 2022. – 66 с.

Методичний посібник містить приклади методик застосування спеціалізованого програмного забезпечення для обробки експериментальних даних та моделювання структурно-фазових перетворень та властивостей у металах та сплавах при їх термічній обробці. Наведено основні послідовності дій при застосуванні програмного забезпечення на конкретних прикладах. Надані запитання для самоконтролю.

Призначений для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальностей 132 – Матеріалознавство та 136 – Металургія. Методичний посібник може бути корисним для студентів інших технічних спеціальностей, в освітньо-професійних програмах яких передбачено вивчення застосування сучасних спеціалізованих програмних забезпечень для моделювання, оптимізації та аналізу металургійних процесів.

Іл. 20. Бібліогр.: 17 найм.

Друкується за авторською редакцією.

Відповідальний за випуск Л. М. Дейнеко, д-р техн. наук, проф.

Рецензенти: В. М. Волчук, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (м. Дніпро)
А. Ф. Санін, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри технології виробництва літальних апаратів Дніпровського національного університету ім. Олеса Гончара (м. Дніпро)

© Подольський Р. В., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Романова Н. С., Сафронова А. О., Клемешов Е.С., 2022
© Україн. держ. ун-т науки і технол., оригінал-макет, 2022

З М І С Т

Вступ.....	4
1 Види спеціалізованого програмного забезпечення, що застосовують в матеріалознавстві та термічній обробці.....	5
2 Застосування спеціалізованих програмних забезпечень.....	8
2.1 ImageJ.....	8
2.1.1 Аналіз фазового складу.....	10
2.1.2 Гранулометричний аналіз.....	12
2.1.3 Визначення розміру зерна.....	13
2.1.4 Визначення міжпластинчастої відстані перліту.....	13
2.1.5 Аналіз поверхні зламів.....	14
2.2 GOM Correlate.....	15
2.2.1 Визначення характеристик при випробуванні на стискання.....	15
2.2.2 Визначення характеристик при випробуванні на розтягування.....	24
2.3 Geomagic ControlX.....	24
2.4 WebPlotDigitizer.....	30
2.5 JMatPRO.....	37
3 Комплексне використання фактичних результатів та математичних даних в моделюванні для матеріалознавства та термічної обробки.....	43
3.1 Теоретичні відомості.....	43
3.1.1 Елементарні відомості з теорії теплопередачі.....	43
3.1.2 Теплопровідність.....	44
3.1.3 Конвекція.....	46
3.1.4 Випромінювання.....	47
3.1.5 Дискретизація середовища для аналізу теплообміну.....	47
3.2 Практичне застосування QForm в задачах матеріалознавства та термічної обробки.....	49
Запитання для самоконтролю.....	62
Література.....	64

ВСТУП

Сучасні дослідження в галузі матеріалознавства, технології отримання та обробки металів проводяться, обробляються та аналізуються із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення (СПЗ) практично на всіх етапах наукового дослідження, технології отримання та обробки матеріалів. СПЗ дозволяє не лише прискорити проектно-конструкторські розробки, робити доступними найскладніші розрахунково-аналітичні процедури, а й отримувати нову інформацію та знання про реальні об'єкти на основі обчислювальних експериментів із математичними та комп'ютерними моделями цих об'єктів.

У цьому методичному посібнику розглянуто приклади вирішення задач матеріалознавства та термообробки за допомогою програм ImageJ, GOM Correlate, Geomagic ControlX, WebPlotDigitizer, JMatPRO та QFORM. Показано можливості СПЗ при створенні 3D-моделей реальних об'єктів та контролю їх розмірних параметрів. Наведено приклади оцінки параметрів кількісного металографічного аналізу, приклади розрахунку, моделювання та прогнозування структурно-фазових перетворень у сплавах при їх термічній обробці, приклади моделювання діаграм ізотермічних та термодинамічних твердофазних перетворень у сплавах. Розглянуто приклади використання програм для отримання числових даних з графічної інформації, яка часто представлена в матеріалознавстві у вигляді графіків, діаграм та критеріальних номограм. На конкретному прикладі показано методику постановки термопружної задачі для моделювання процесу термічної обробки, структурно-фазових перетворень та кінцевих фізико-механічних властивостей виробів у пакеті QForm..

Результати використані в методичному посібнику, є результатами досліджень, що отримані авторами особисто.

1 ВИДИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬ В МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ ТА ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ









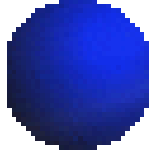





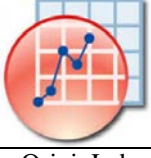
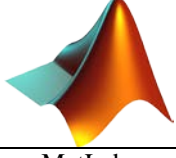

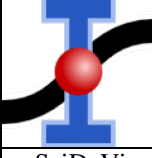
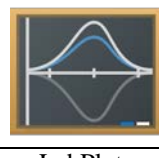
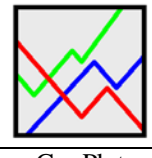








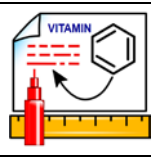
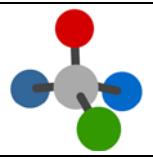
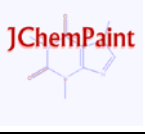





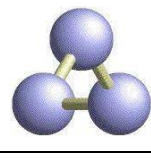


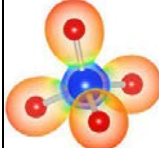


Моделювання – це процес створення та дослідження моделей об'єктів, процесів, явищ та систем з метою опосередкованого вивчення властивостей та характеристик оригіналу, а також з метою передбачення. У цьому посібнику розглядається лише комп'ютерне та математичне моделювання процесів, пов'язаних із матеріалознавством та термічною обробкою металів.

Аналіз даних – це розділи математики та інформатики, які розробляють та вивчають математичні методи та обчислювальні алгоритми отримання знань з експериментальних та модельованих даних. Для виконання якісного моделювання необхідно застосовувати спеціалізоване програмне забезпечення.

Спеціалізоване програмне забезпечення (далі – СПЗ), що застосовується для вирішення інженерно-матеріалознавчих завдань – це допоміжний інструмент, що дозволяє застосовувати сучасні методи математичного та фізичного моделювання, дослідження структури, фізичних, механічних, функціональних та технологічних властивостей матеріалів для вирішення матеріалознавчих проблем.

Застосування СПЗ на підприємствах, в інженерно-дослідницьких та конструкторських підрозділах дозволяє зменшити витрати на дослідження, надати більш глибокий аналіз отриманих результатів, зменшити вплив «людського фактору».

СПЗ, що застосовуються на сьогоднішній день в матеріалознавстві та термічній обробки, велика кількість, їх можна розділити на такі групи (рис. 1.1): 1) система аналізу методом кінцевих елементів; 2) моделювання CALPHAD; 3) платформи для контролю геометрії та якості при роботі з 3D-моделями та CAD-моделями; 4) аналіз даних і побудова графіків; 5) розширений статистичний аналіз; 6) програма для моделювання атомарної будови; 7) дослідження структур в 3D; 8) утіліта для моделювання рентгенівської кристалічної структури. Для ефективного використання кожного СПЗ необхідно мати чітке розуміння процесу, до якого воно застосовується.

Група	Основний вибір	Альтернативний вибір					
1							
	AnSYS	Comsol	Abaqus	QForm	Deform	Simufact	
2							
	CALPHAD	ThermoCalc	JmatPro	Pandat	FactSage	MatCalc	
3							
	Geomagic Control X	GOM Correlate*					
4							
	OriginLab	MatLab	WebPlot	MagicPlot	SciDaVis	LabPlot	GnuPlot
5							
	MathCad	SPSS	Statgraphics	Prism	PSPP	R	
6							
	ChemDraw	ChemDoodle	ChemSketch	BKChem	JChemPaint		
7							
	Zeiss Atlas 5	imageJ	Chem3D	Avogadro	Jmol	RasMol	
8							
	CrystalMaker	Mercury	VESTA	Diamond	XCrySDen		

*Примітка – також застосовується і в 4 групі.

Рисунок 1.1 – Спеціалізоване програмне забезпечення, що застосовується в матеріалознавстві та термічній обробці

При розгляді груп 1, 3 слід зазначити, що застосування математичних виразів цих груп виконується з застосуванням математичних моделей в комплексі з 2D-фрагментами та CAD-моделями наближених до реальних об'єктів. Загальний процес моделювання з застосуванням цих груп можна показати у вигляді структурної схеми (рис. 1.2).

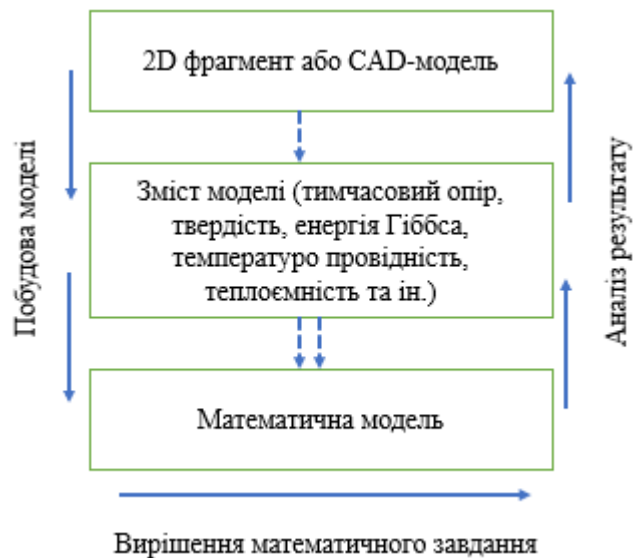


Рисунок 1.2 – Структурна схема проведення та отримання результатів математичного моделювання

Виходячи з структурної схеми встановлено, що на першому етапі необхідно створити 2D фрагмент чи CAD – модель. Для цього застосовуються програми типу: SolidWorks, AutoCAD, Fusion360, КОМПАС. На другому етапі – внесення до моделі змінних характеристик. Також слід зазначити, що в процесі математичного моделювання можливе внесення додаткових характеристик з застосуванням СПЗ (груп 4–8) та експериментальних даних. Третій етап – обґрунтування та формування математичної моделі. Четвертий етап отримання результатів, аналіз, верифікація (перевірка з експериментальними даними).

2 ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПРОГРАМНИХ ЗАБЕЗПЕЧЕНЬ

Аналіз результатів розрахунку на основі запропонованої математичної моделі дозволяє скоригувати її, вносячи або додаткові параметри в зміст моделі, або кардинально змінюючи математичну модель. Для отримання найбільш адекватного результату моделювання потрібна досить велика кількість фізико-хімічних параметрів, що входять до змісту моделі (рис. 1.2). Для цього використовуються СПЗ із груп 4–8. Розглянемо кілька варіантів застосування представлених на рисунку 1.1 програм та послідовність дій при їх застосуванні.

2.1 ImageJ

Програма ImageJ – це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, що написана на мові Java для аналізу та обробки зображень, в тому числі мікроструктур. Аналіз в ImageJ виконується на зображеннях 8-біт (рис. 2.1), 16-біт, 32-біт, 8-біт color та RGB color. Зображення складається з пікселів, кожний піксель має свою координату X, Y та свій відтінок: для 8-біт – 256 відтінків, 16-біт – 65536 відтінків 32-біт – 4294967296 відтінків, де значення 0 – це чорний колір, а 255, 65535 чи 4294967296 відповідно – це білий колір. При розгляді RGB color (red, green, blue) кодування зображення виконується червоним, зеленим та синім кольорами, що видає 281474976710656 відтінків основних кольорів.

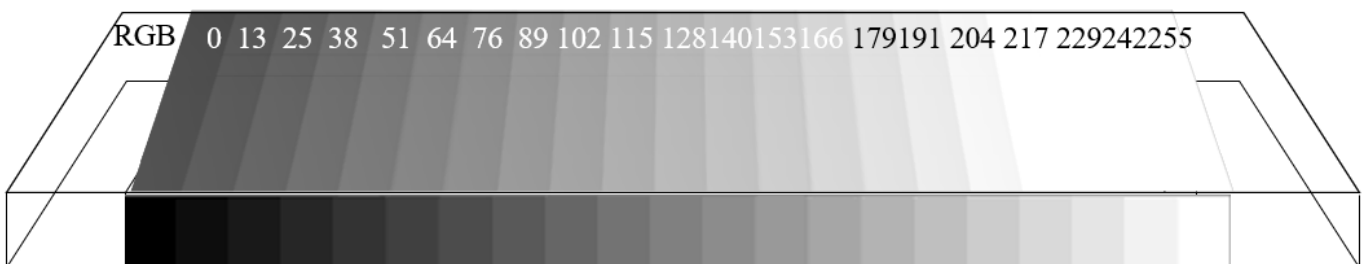


Рисунок 2.1 – Чорно-біла палітра комп'ютерної графіки 8 біт зображення

Слід зазначити, що даний програмний комплекс розповсюджується без ліцензійних обмежень.

Робочий простір ImageJ представлено на рисунку 2.2. Складається з меню програми (червона рамка) та допоміжних інструментів (зелена рамка).

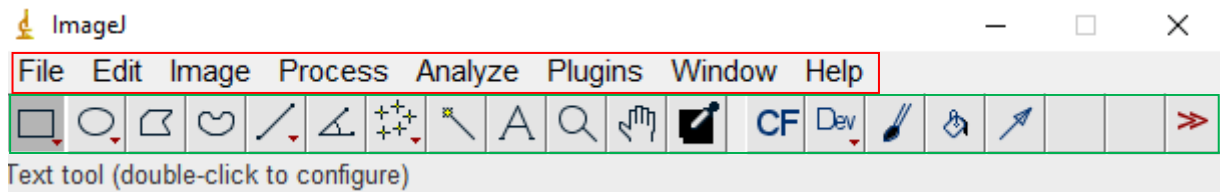


Рисунок 2.2 – Робочий простір ImageJ: меню програми – червона рамка, допоміжних інструментів – зелена рамка

На першому етапі аналізу відкриваємо фото мікроструктури чи фрактографії в робочому просторі програми наприклад (рис. 2.3, а – е).

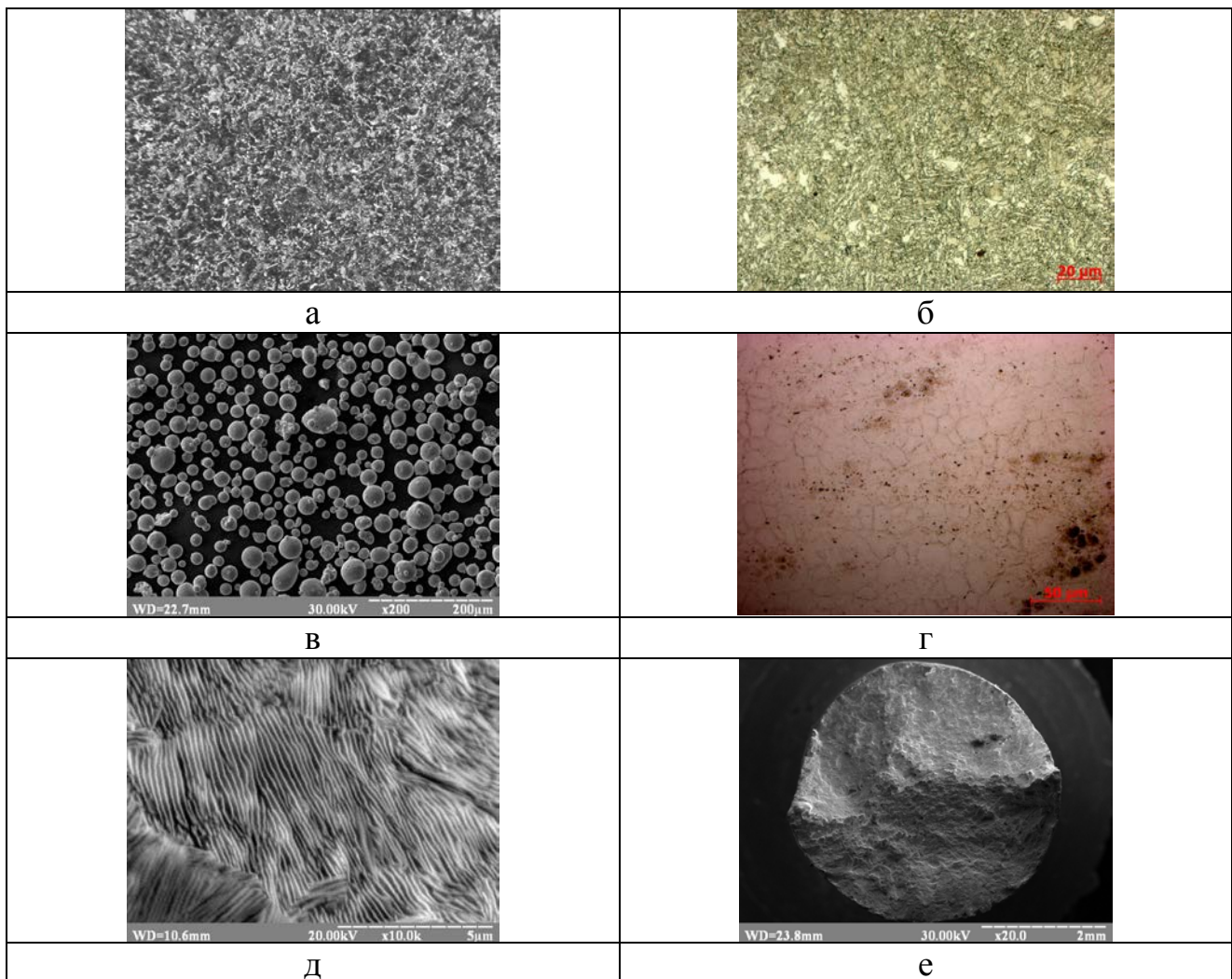


Рисунок 2.3 – Мікроструктура та фрактографія : а – ферито-перлітна структура сталі; б – бейніто-аустенітна структура сталі; в – гранули металевого порошку; г – дійсне аустенітне зерно; д – структура перліту сталі; е – фрактографія поверхні руйнування після випробування на розтягування

Перед початком аналізу фото обов'язково необхідно встановити параметри: одиниці виміру та відому довжину (шкала). Для цього слід провести паралельну пряму лінію до відомої шкали (масштабна лінійка, зображена на фото), встановити масштаб та одиницю вимірювання (нм- nm, мкм-um, мм-mm тощо) в пункті меню Analyze => Set Scale (known distance (напр. 200) та unit of length (напр. um) відповідно та натиснути клавішу ОК. Даний пункт виконується відповідно для всіх фото мікроструктур та фрактографії на початку роботи, тому далі по тексту він не зазначається.

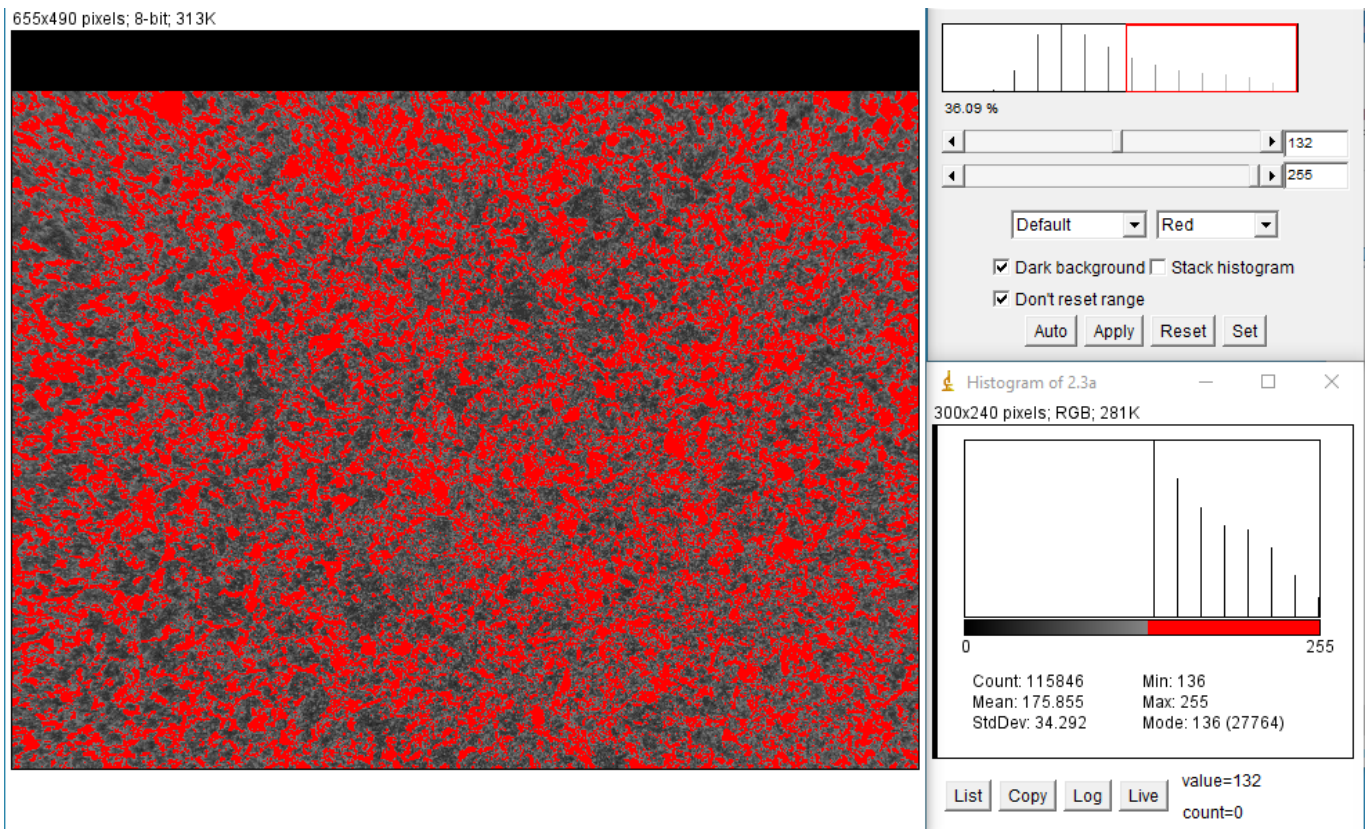
З метою демонстрації розглянемо п'ять прикладів застосування даного програмного комплексу, а саме для проведення: аналізу фазового складу; гранулометричного аналізу; визначення розміру зерна; визначення міжпластинчастої відстані перліту; аналізу поверхні зламів (фрактографія).

2.1.1 Аналіз фазового складу

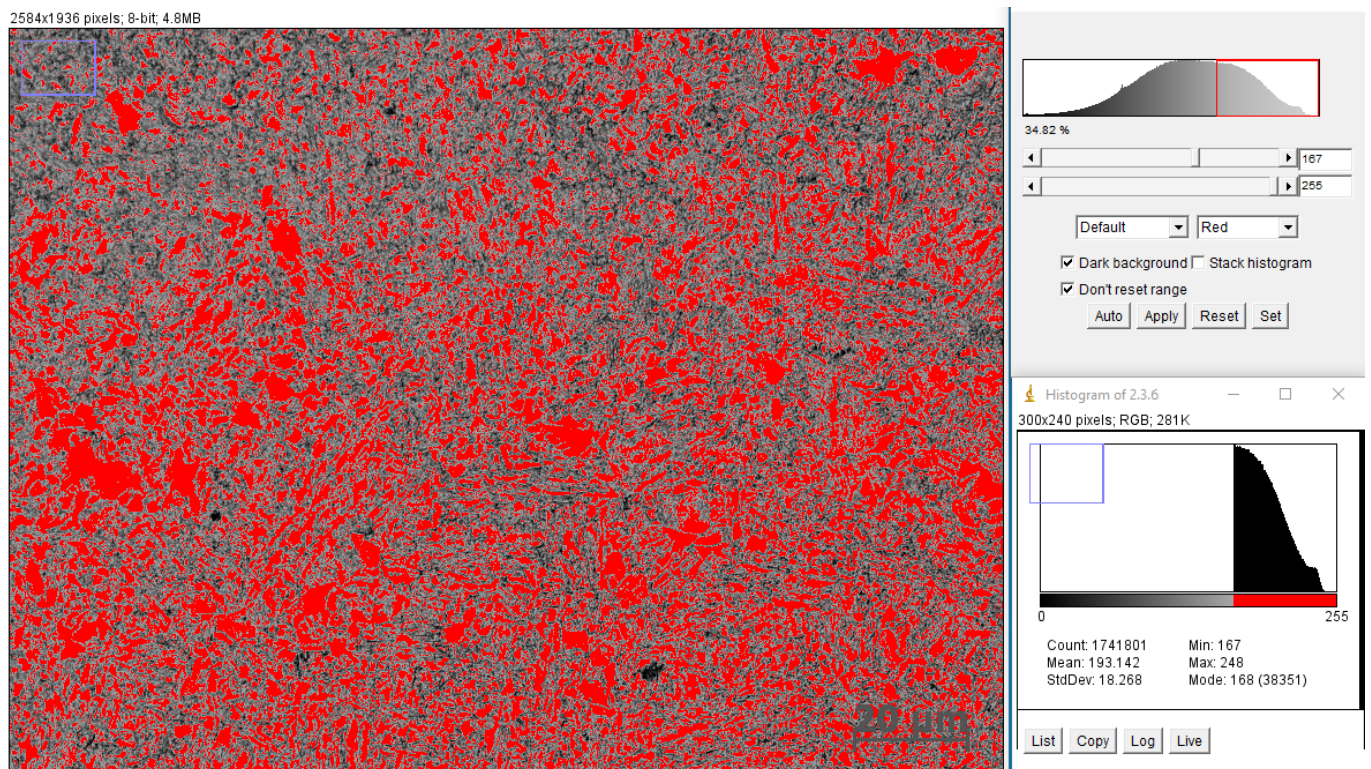
Для встановлення відсоткового вмісту фазових складових сталі, мікроструктуру яких зображено на рисунку 2.3 а, б – фериту і аустеніту відповідно, необхідно в першу чергу змінити тип зображення мікроструктури в чорно-білий 8-біт. Для зміни типу зображення необхідно перейти в пункт меню: Image=>Type=> 8-bit.

Наступний етап полягає в налаштуванні границь: Image=>Adjust=>Threshold... (рис. 2.4). На гистограмі: по осі X відображено значення відтінків сірого (0;255) по осі Y (0;255) кількість пікселів, які дають той чи інший відтінок сірого відповідно до осі X. Переміщуємо бігунок осі X для виділення всіх зон феритної чи аустенітної зони та закриваємо вікно «Threshold». Для відсоткового визначення площі переходимо: Analyze=> Measure. Отримаємо таблицю «Results» (результати), в якій зазначено «%Area» (%площі), що зафарбовано відносно всього досліджуваного поля.

Примітка: якщо даного стовпцю не має в таблиці «Results», то в меню таблиці: Results=>Set Measurements встановити галочку біля «Area fraction» (Частка площі) та натиснути ОК (після встановлення галочки треба перевідкрити вікно Results для підтягування даних в стовпець «%Area» (%площі).



а



б

Рисунок 2.4 – Результати визначення відсоткової частки феритної (а), аустенітної (б) фази

2.1.2 Гранулометричний аналіз

При проведенні гранулометричного аналізу (аналіз часточок, агломератів), змінюємо тип фото (рис. 2.3, в) на 8-біт (див п. 2.1.1). Для визначення кількості та розміру частинок необхідно на першому етапі налаштувати границі (див п. 2.1.1). Якщо досліджувані частинки не чорного кольору, а білого, необхідно встановити галочку «Dark background». Після налаштування границь закриваємо відповідне вікно. Для вимірювання часточок переходимо: Analyze=> Analyze Particals (рис. 2.5). При аналізі всіх частинок необхідно в «Size (pixel²)» (діапазон розміру частинок) встановити 0-infinity (даний параметр може змінюватись відповідно до граничного розміру, який необхідно проаналізувати). Наступний параметр – «Circularity» (параметр сферичності) 0,00–1,00 (0,00 – форма паралелепіпеда; 1,00 – ідеально сферична форма). «Show» (показ) – виведення додаткового зображення врахованих даних – встановити «Outlines» (виводить зображення з нумерацією, числа відповідають табличним даним). Display results – вікно результатів з даними про кожну частинку. Clear results – видалити всі попередні вимірювання. Summarise – вікно загальна кількість частинок. Exclude on edges врахування всіх «завершених» частинок до розрахунку (виключає з розрахунку всі частинки, що частково знаходяться в полі зору). Після встановлення всіх необхідних характеристик натискаємо «ОК». Всі дані розрахунку отримані в таблиці «Summarise» та «Results» зберігаємо.

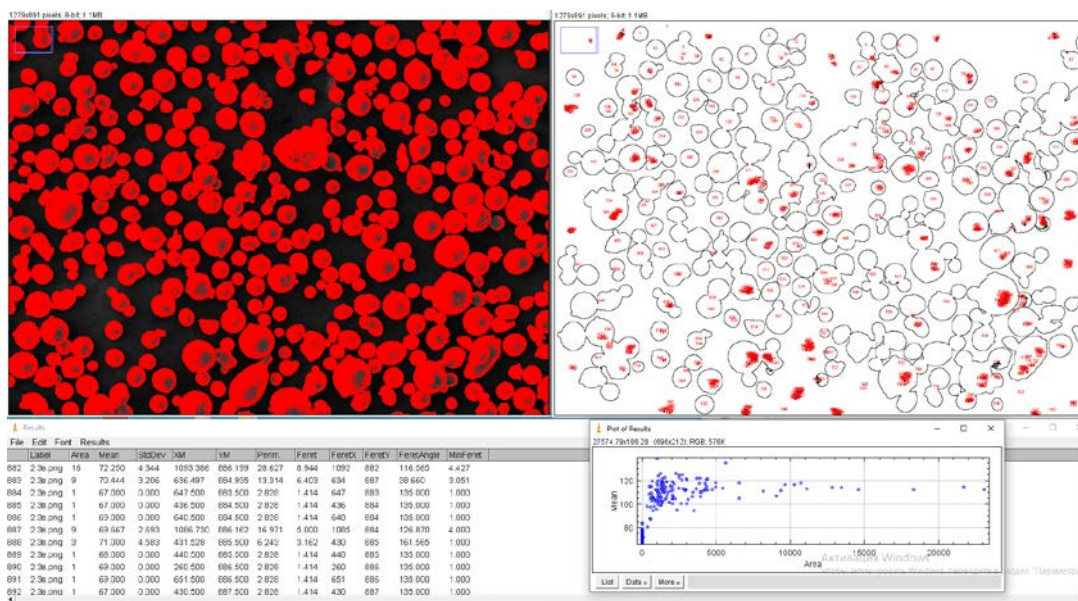


Рисунок 2.5 – Результати гранулометричного аналізу часточок металевого порошку

2.1.3 Визначення розміру зерна

При визначенні розміру дійсного аустенітного зерна сталі, що зображено на рисунку 2.3, г змінюємо тип на 8-біт (див п. 2.1.1). Для визначення кількості та розміру зерен необхідно на першому етапі налаштувати границі (див п. 2.1.1). Для вимірювання зерен переходимо в «Analyze» => «Measure», після чого з'являється таблиця Results. В допоміжних інструментах (див. рис. 2.2) обираємо «Straight» (лінія) і проводимо лінію від початку до кінця обраної границі зерна і натискаємо «M» клавішу (на англ. розкладці) тим самим фіксуємо кожну відмічену границю. Після встановлення всіх необхідних ліній вимірювань натискаємо «OK». Всі результати розрахунку отримані в таблиці «Results» зберігаємо (рис. 2.6).

Примітка: при визначенні площі використовувати параметри значень діаметру Фере (додати через Results=>Set Measurements=>Feret's diameter).

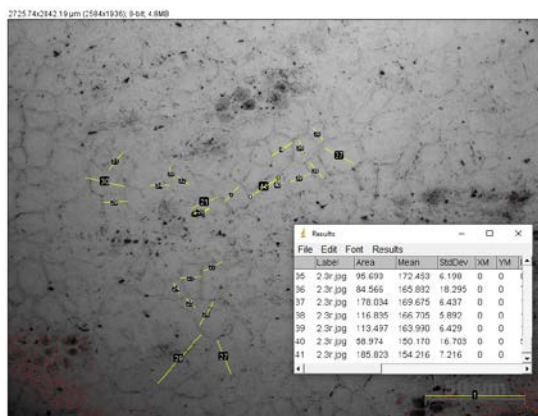


Рисунок 2.6 – Результати визначення розміру аустенітного зерна

2.1.4 Визначення міжпластинчастої відстані перліту

При визначенні міжпластинчастої відстані перлітної структури за методом січних, змінюємо тип зображення на рисунку 2.3, д на 8-біт (див п. 2.1.1). Для визначення відстані між пластинами необхідно на першому етапі налаштувати границі (див п. 2.1.1). Для вимірювання міжпластиночної відстані переходимо в «Analyze» => «Measure» проводимо «Straight» (лінія) від границі до границі рейки натискаємо клавішу на англ. розкладці «M» Після встановлення всіх необхідних ліній виміру натискаємо «OK». Всі дані розрахунку отримані в таблиці «Results» зберігаємо (рис. 2.7).

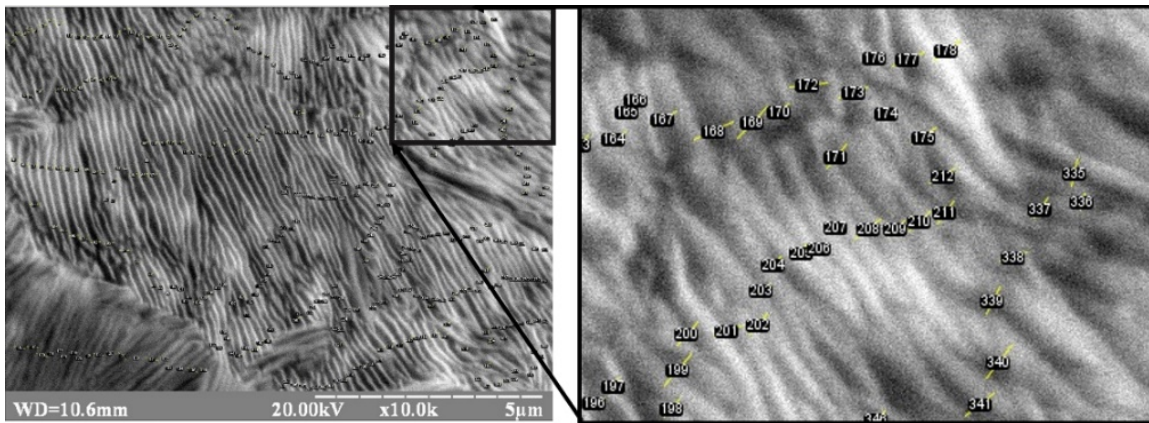


Рисунок 2.7 – Принцип застосування комплексу ImageJ за методикою проведення січних

2.1.5 Аналіз поверхні зламів (фрактографія)

При аналізі поверхні зламів (фрактографії), на прикладі зображення на рисунку 2.3, е, необхідно володіти питаннями колоризації фото та зміни кута нахилу при скануванні електронним мікроскопом поверхні зламу. На попередньому етапі виконуємо вказівки, що зазначені в п. 2.1.1. В значку «>>», що знаходиться в допоміжних інструментах обираємо пункт «Magic Image» та обираємо на комп'ютері колоризоване зображення, чи серію фото з різним кутом нахилу. Переходимо до розбивання каналів відтінків та кольорів зображення. Для цього переходимо в меню «Image»=> Color=> Split Channels та зберігаємо кожне отримане фото з підписами RGB (red, green, blue). Виділяємо область контролю (коло, квадрат, паралелепіпед) на збережених зображеннях та слідуємо шляхом: «Image»=> Color=> Marge Channels. Потім у вкладці Plugins=> 3D=> Interactive 3D Surface Plot Всі дані аналізу, що отримані, зберігаємо (рис. 2.8).

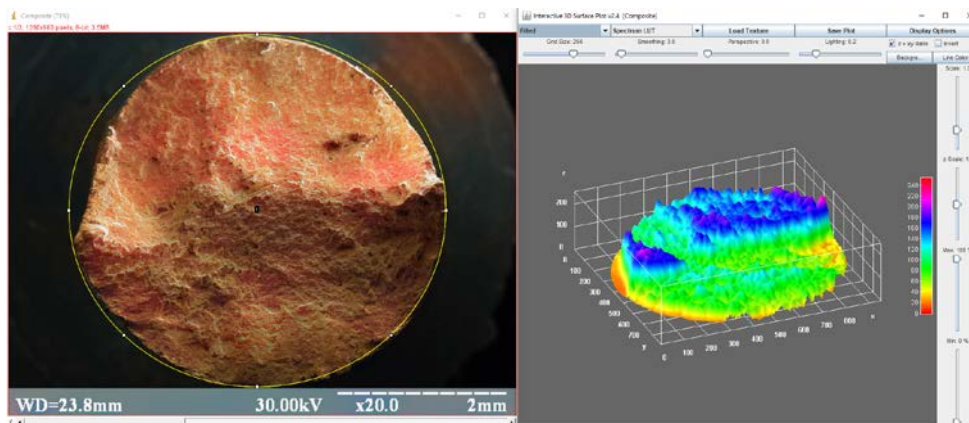


Рисунок 2.8 – Результати аналізу фрактографії

За результатами аналізу зображення можна визначити частку в'язкої та крихкої складової зламу.

2.2 GOM Correlate

GOM Correlate – це програмний пакет для кореляції цифрових зображень (DIC) та тривимірного аналізу руху під час випробувань матеріалів та компонентів. Програмне забезпечення використовується для визначення властивостей матеріалів, а також для перевірки та оптимізації чисельного моделювання. GOM Correlate застосовується у фундаментальних дослідженнях, розробці продуктів та аналізі відмов [1].

Цифрова кореляція зображень (DIC) – це оптичний безконтактний метод вимірювання тривимірних координат для оцінки тривимірних поверхонь, тривимірного руху та деформації [1].

Безкоштовне програмне забезпечення GOM Correlate забезпечує доступ до всіх результатів вимірювань [1].

Розглянемо застосування даного програмного пакету при випробуваннях на стискання та розтягування. За стандартною методикою на стискання та розтягування використовують ряд стандартів ГОСТ 28840, ГОСТ 25.503, ГОСТ 1497, ISO 6892 та ін. При проведенні випробувань з програмним пакетом GOM Correlate та фіксацією деформації за методом DIC використовуються допоміжні праймери (аерозольна фарба білого та чорного кольору) для нанесення тонкого шару, що виконують роль базису фіксації для безконтактного методу. Слід зазначити, що фотофіксація при випробуванні повинна виконуватись з частотою 1 фото/секунду, фото обов'язково повинні бути в форматі *.bmp з послідовним маркуванням (напр. 0001.bmp, 0002.bmp...0111.bmp). Розглянемо більш детально випробування на стискання та додатково випробування на розтягування з побудовою діаграми Stress-Strain.

2.2.1 Визначення характеристик при випробуванні на стискання

На рисунку 2.9 показано поетапне застосування програмного пакету GOM Correlate та фіксація деформації за методом DIC при випробуваннях на стискання.

1. Обираємо New Project на головному екрані, який висвітлиться після запуску програми GOM Correlate

2. У лівому верхньому кутку обираємо вкладку File. З переліку обираємо Import→File...

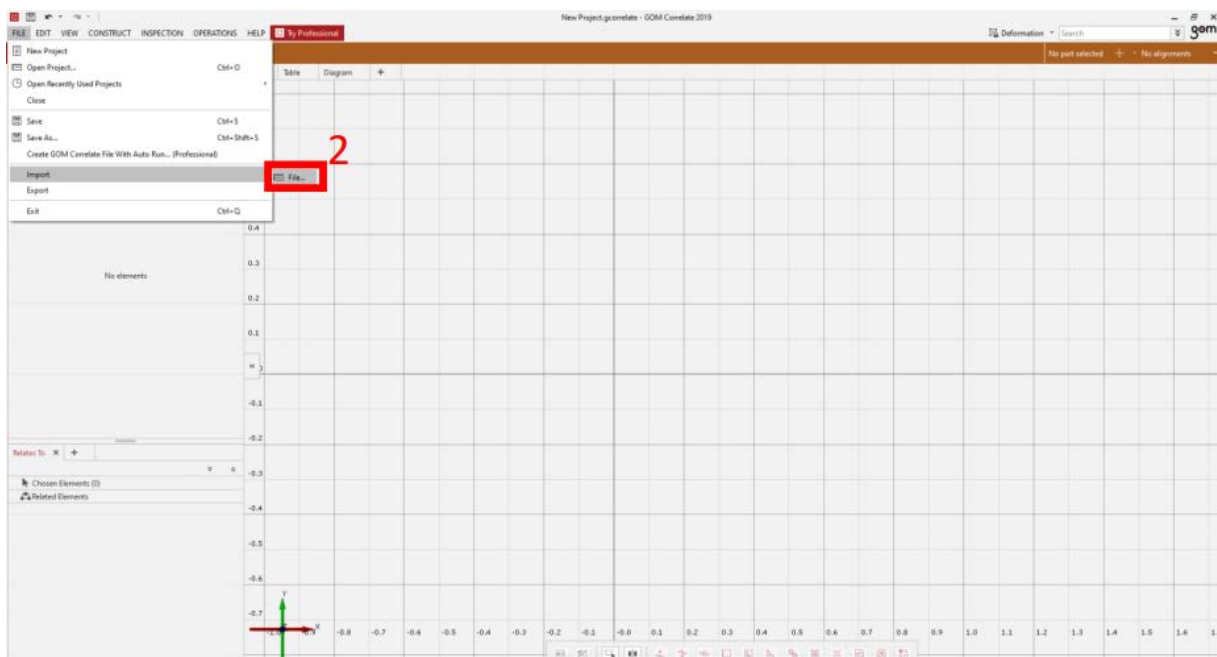
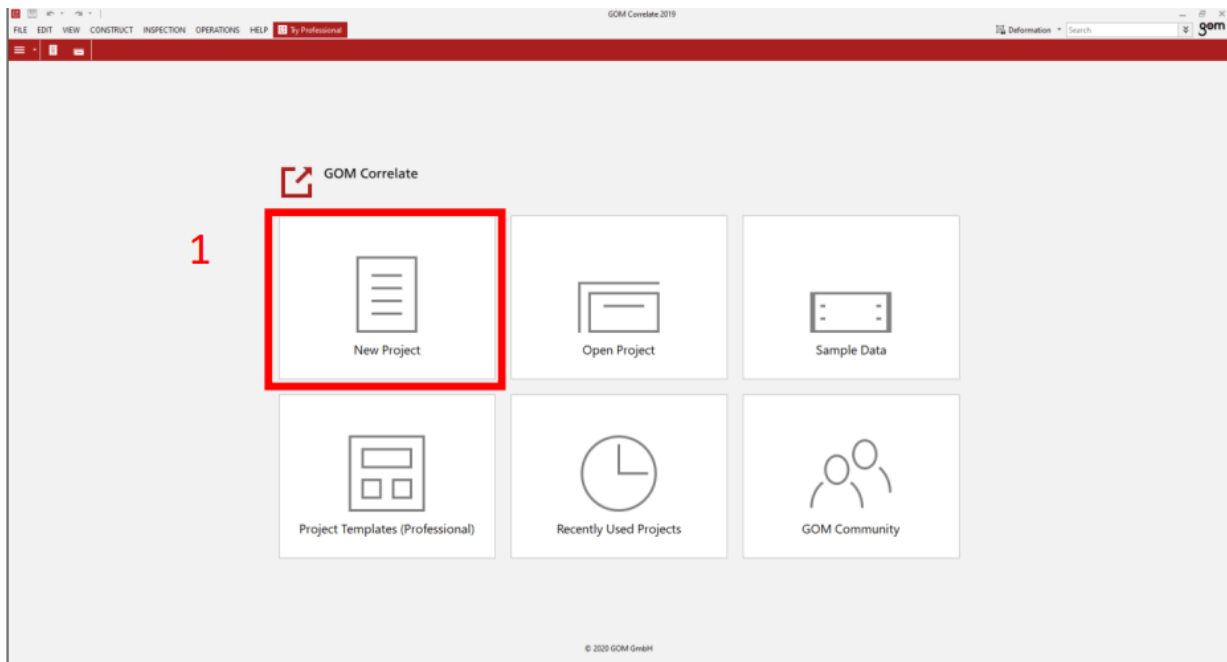
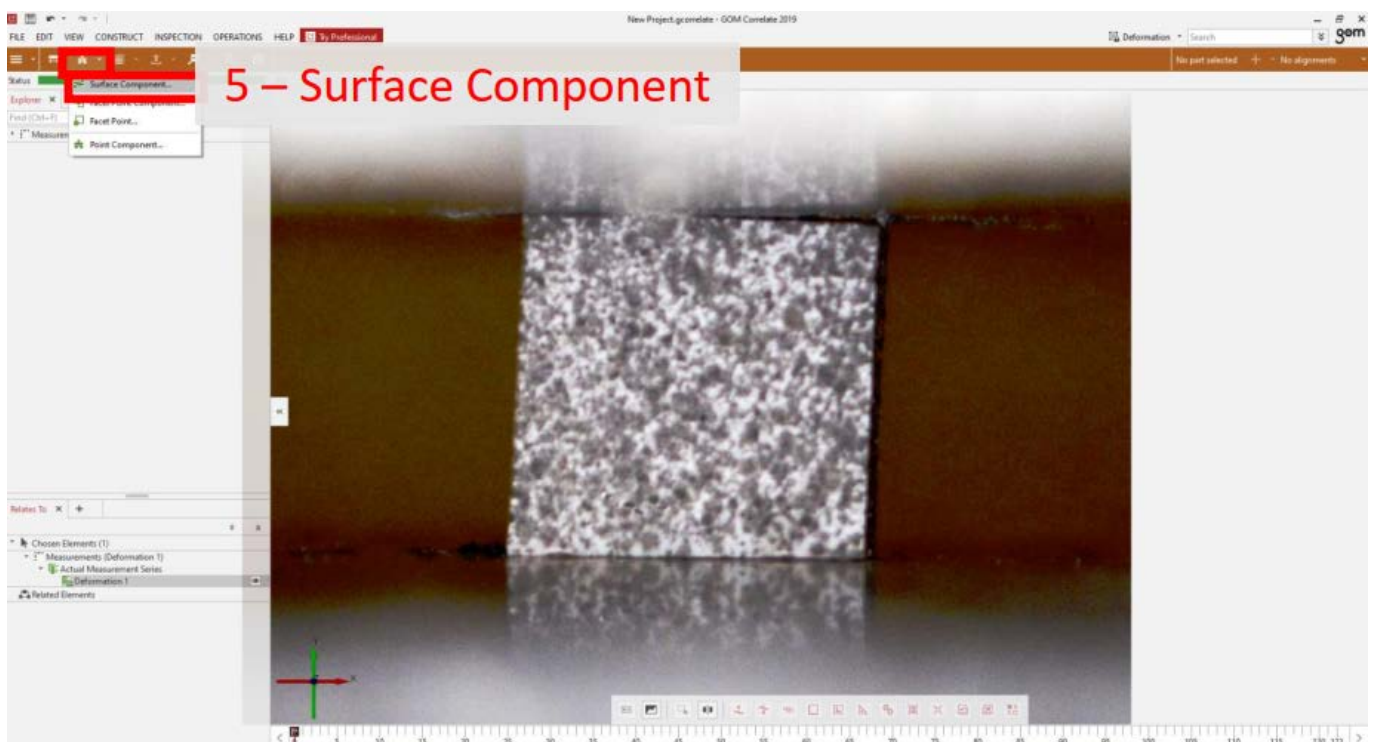
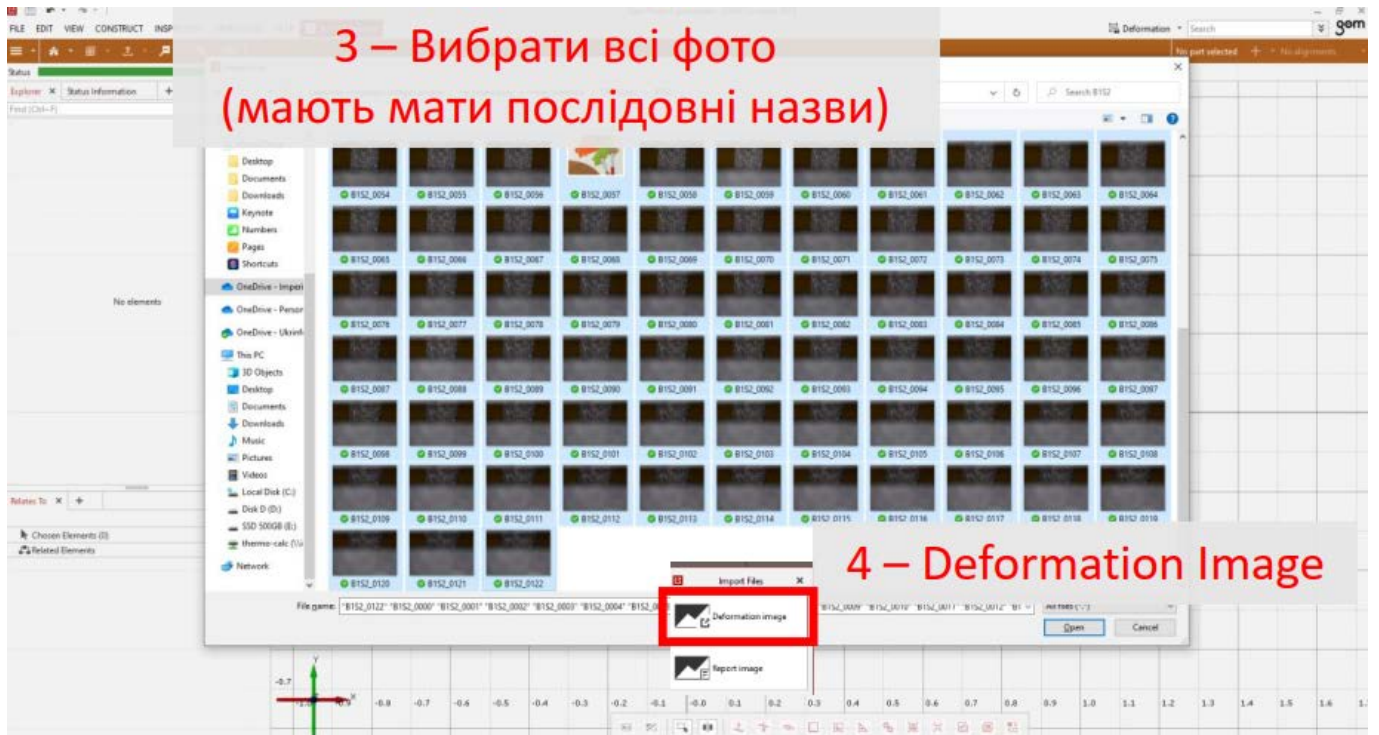


Рисунок 2.9 – Поетапне проведення аналізу DIC – зображень при випробуваннях на стискання

3. Обираємо необхідні фото. Всі обрані фото **ОБОВ'ЯЗКОВО** мають мати **ПОСЛІДОВНІ** назви!

4. Знизу у вікні завантаження файлів обираємо Deformation Image.

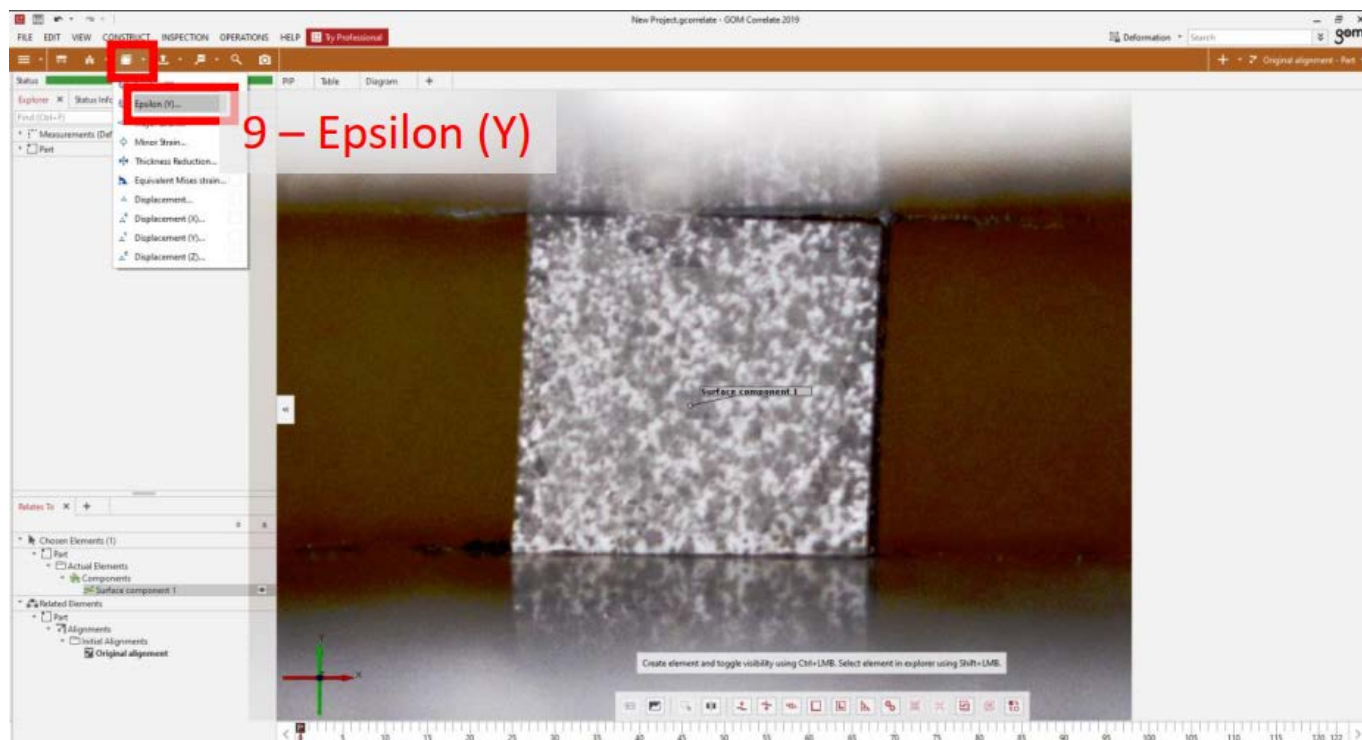
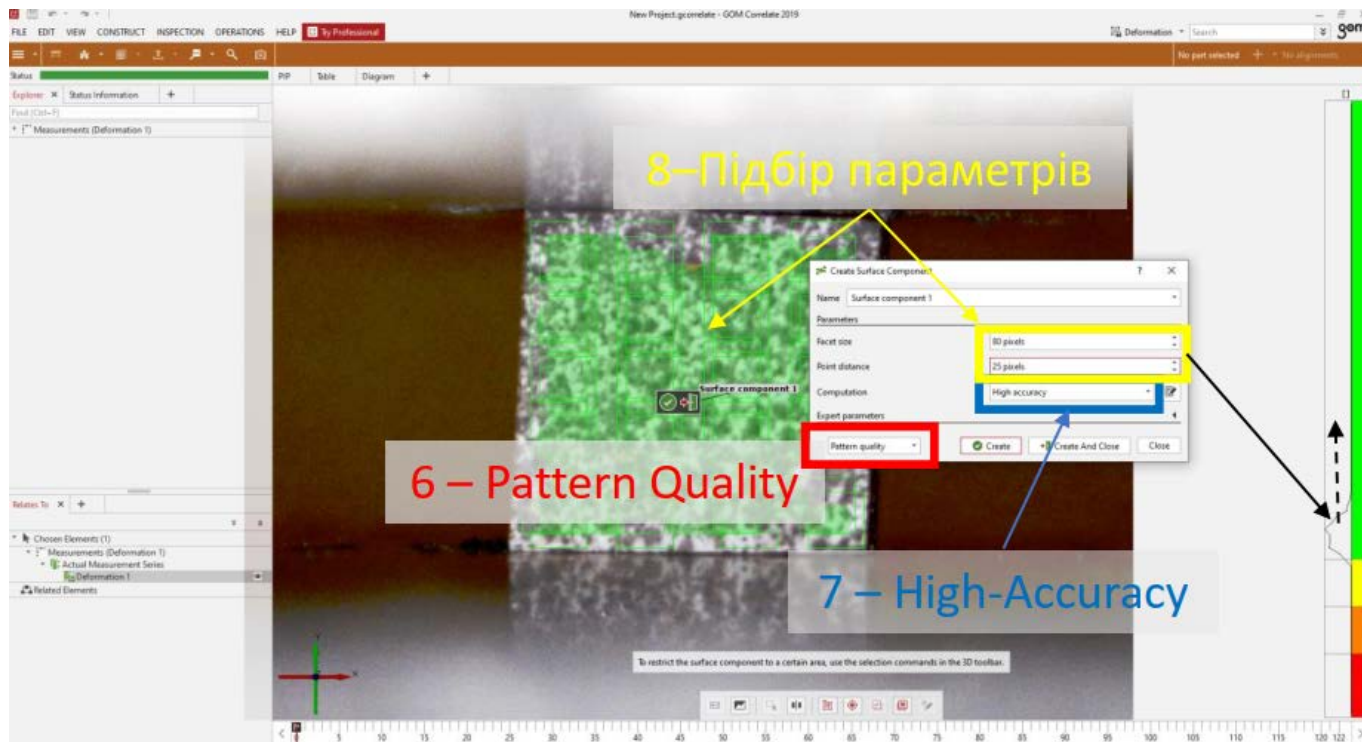
Продовження рисунка 2.9.



5. Після завершення завантаження фото обираємо на верхній панелі у Визначити компонент → Surface Component.

6. З'явиться вікно підбору параметрів Create Surface Component. Обираємо такі параметри: -Facet size: 80 pixels, Point distance: 25; Computation: High accuracy, Pattern quality.

Продовження рисунка 2.9.



7. Далі як на фото-інструкції обираємо (перевірити всі видимі фактичні компоненти) Epsilon (Y).

8. З'явиться вікно Check Epsilon (X). Обираємо такі параметри: Strain representation: True strain; Against fixed value.

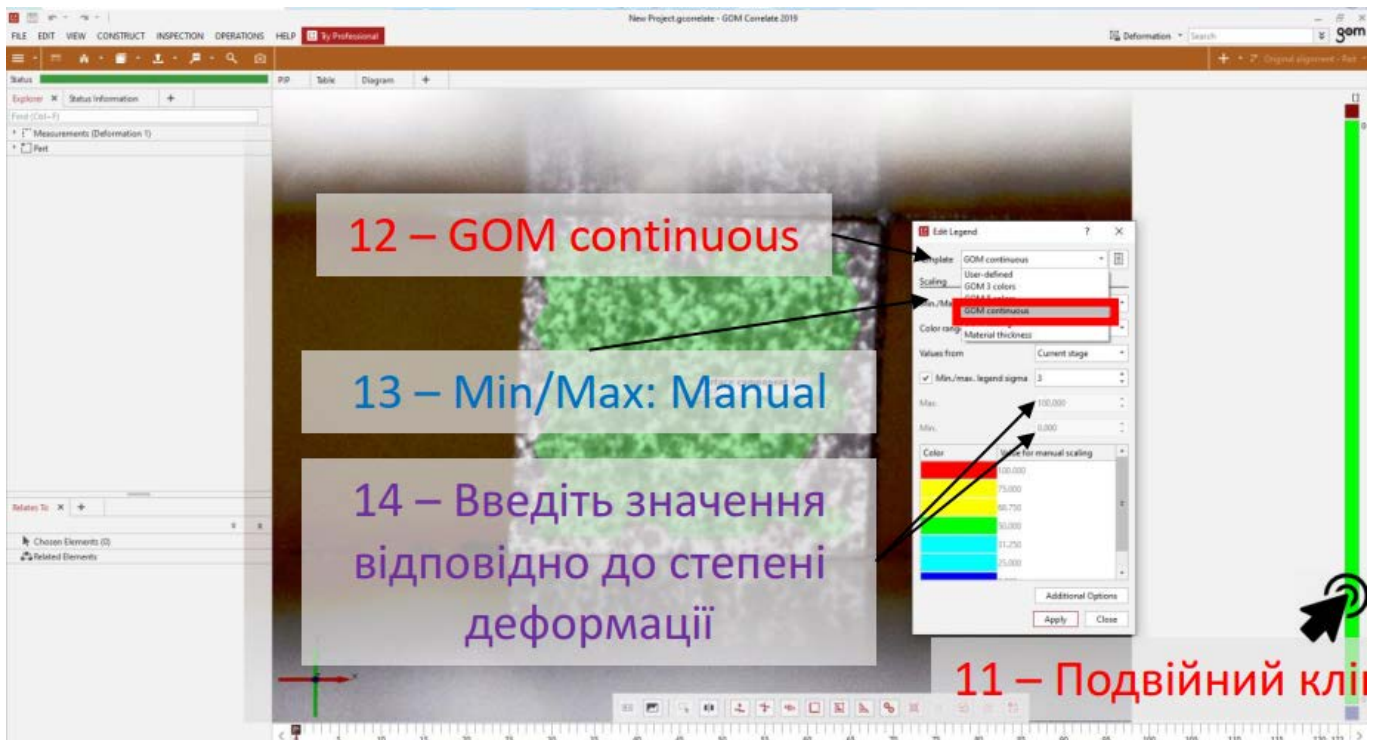
Продовження рисунка 2.9.



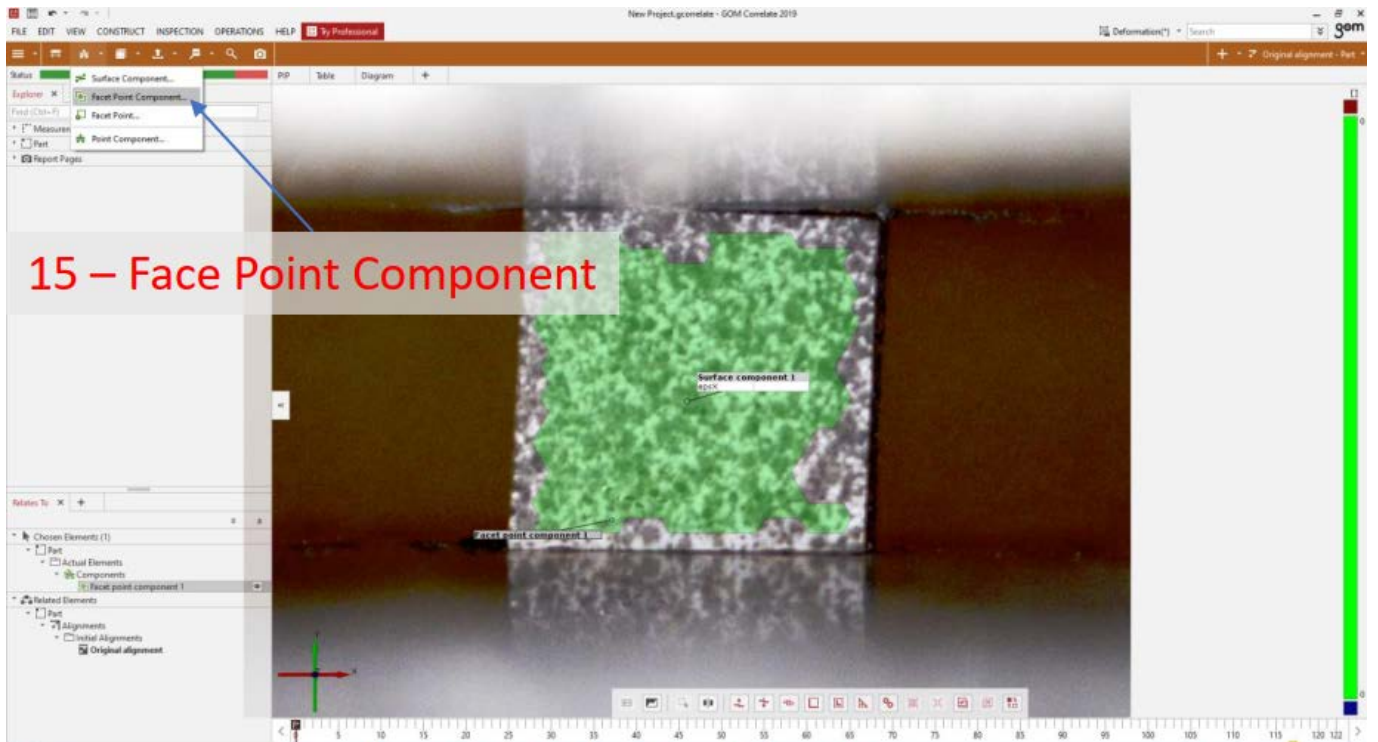
9. Зробити подвійний клік на зеленій смузі з правої сторони.

10. З'явиться вікно Edit Legend. Обираємо такі параметри: GOM Continuous; Min/Max: Manual; Ввести значення відповідно до ступеня деформації.

11. Обрати Face Point Component як вказано на фото-інструкції.



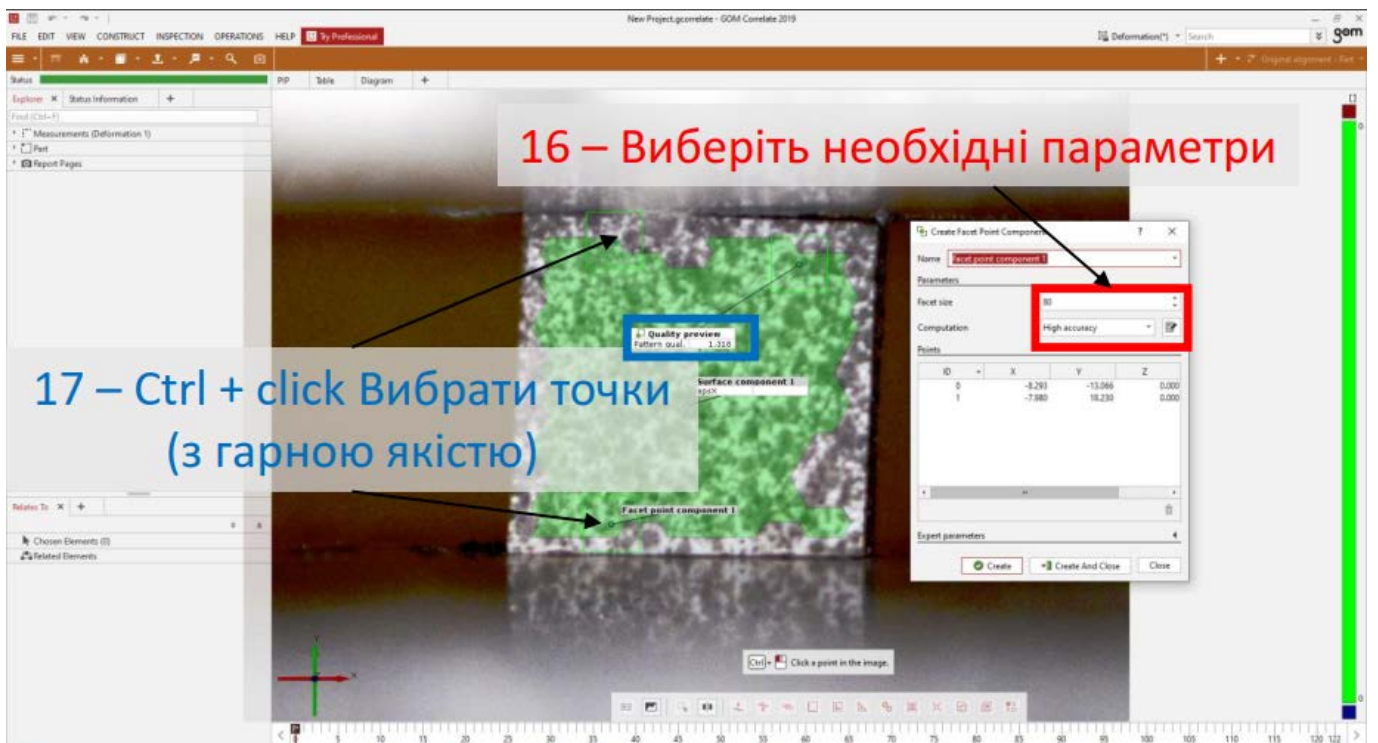
Продовження рисунка 2.9.



12. Обрати необхідні параметри у вікні Create Facet Point Component:

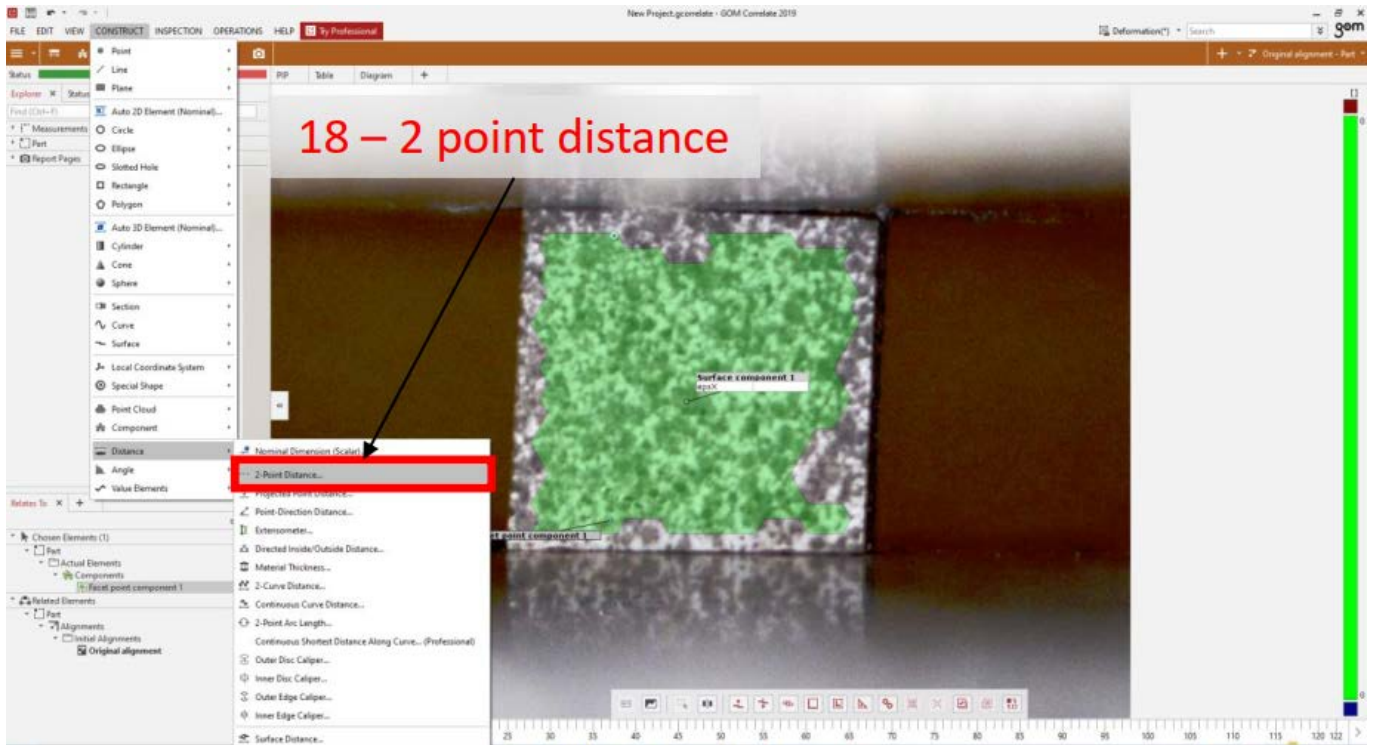
-Facet size: 80;

-Computation: High accuracy

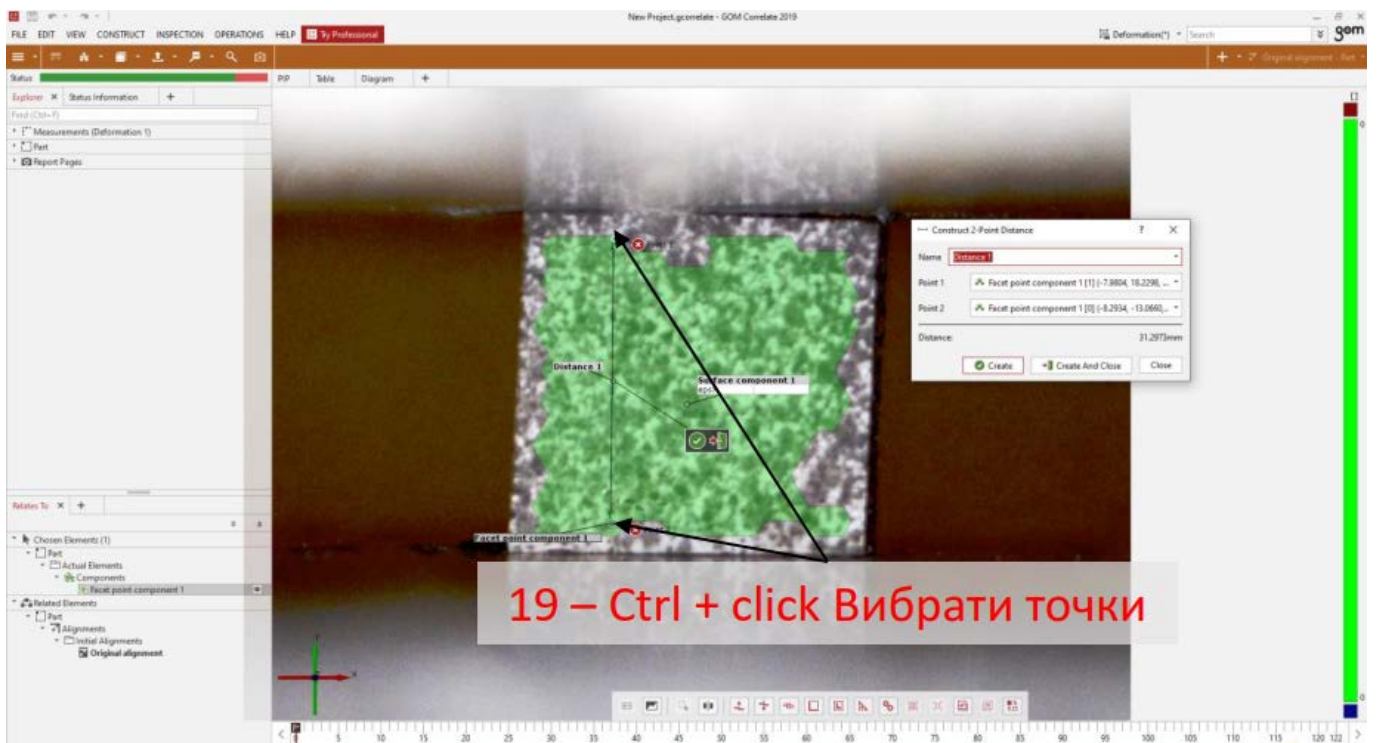


13. За допомогою команди Ctrl+click обрати дві точки з гарною якістю на моделі.

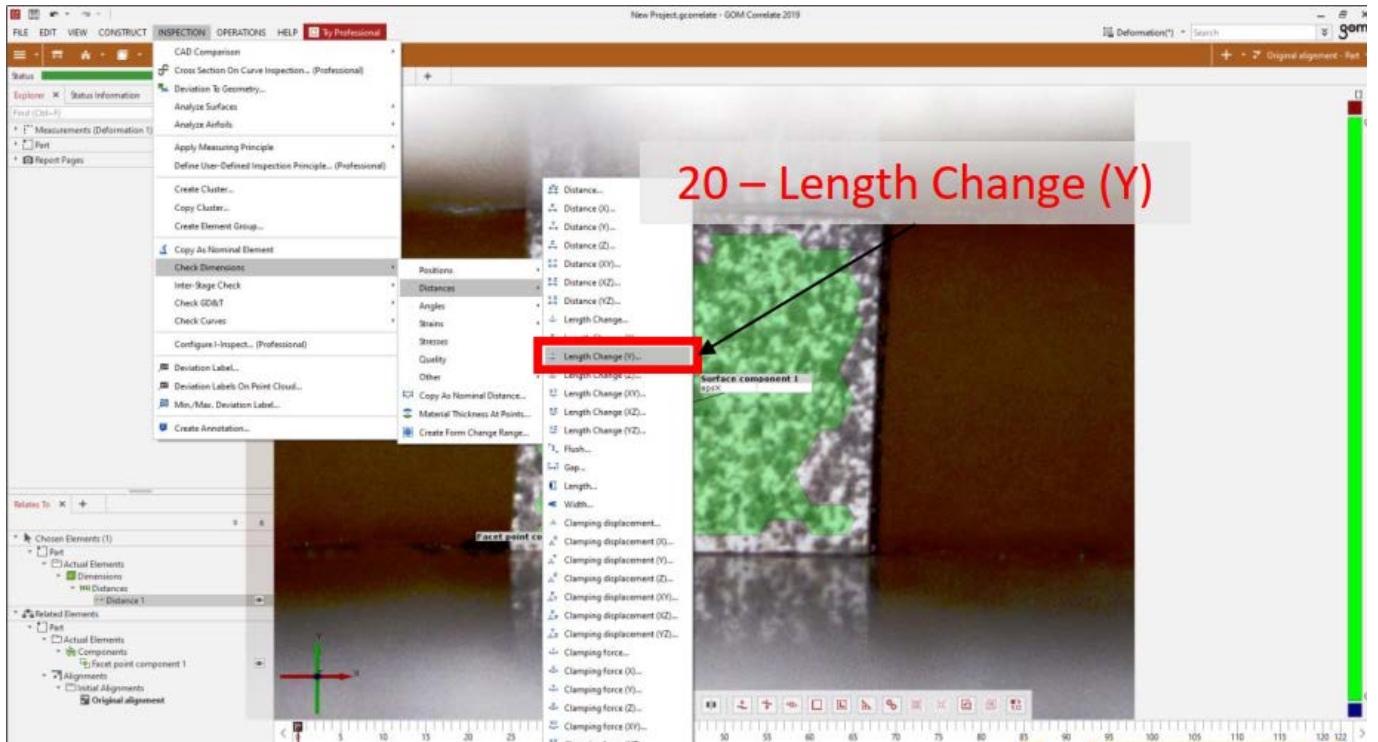
Продовження рисунка 2.9.



14. Через вкладку CONSTRUCT→Distance→2 Point Distance...

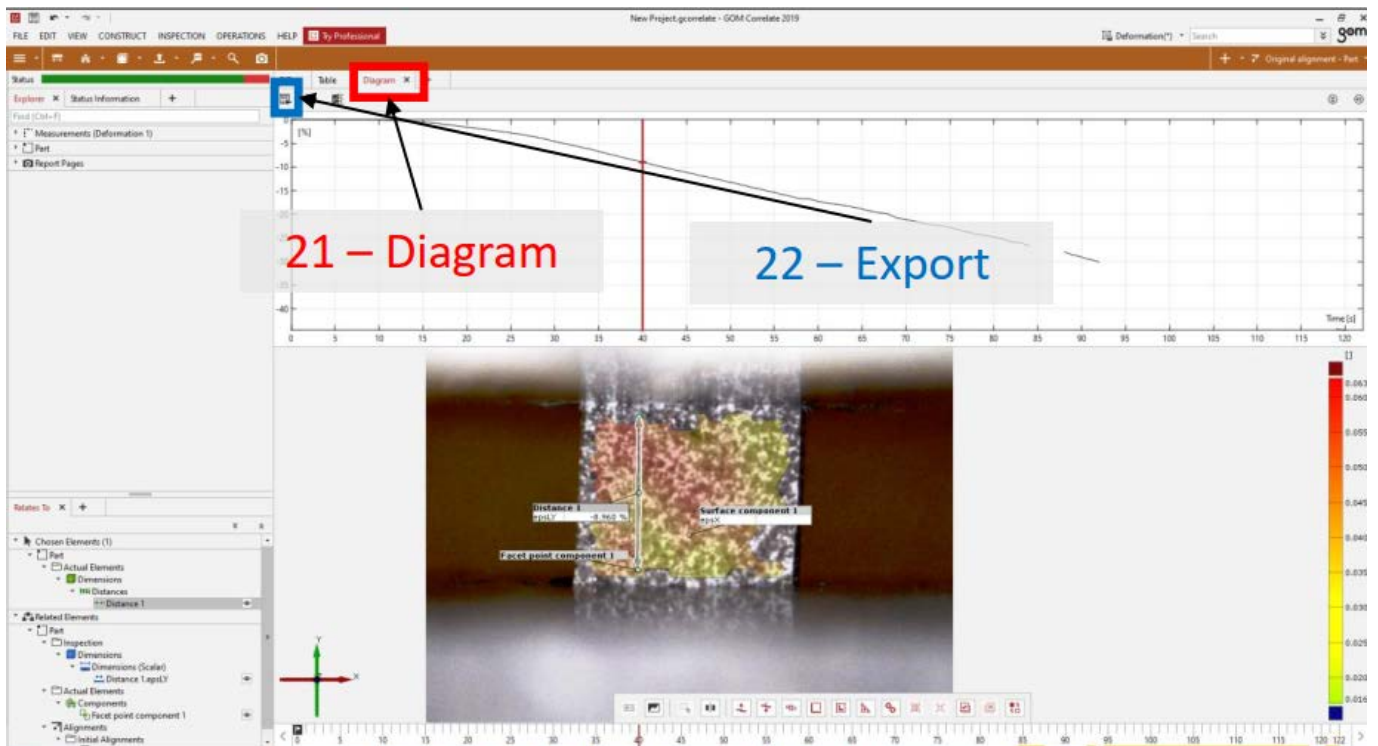


Продовження рисунка 2.9.

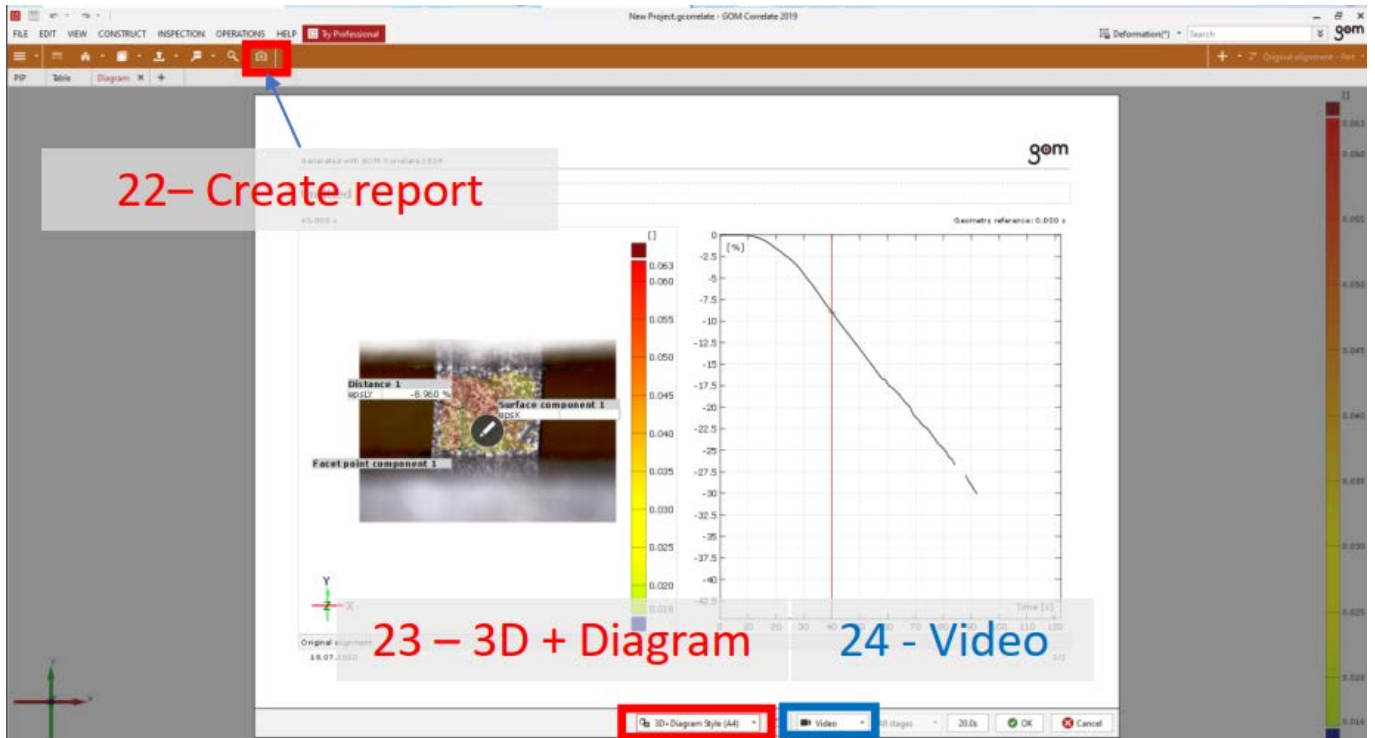


15. З'явиться вікно Construct 2 Point Distance. На моделі необхідно буде обрати 2 точки за допомогою команди Ctrl+click.

16. Обрати у верхній панелі INSPECTION→Check Dimensions→Distances→Length Change (Y)...



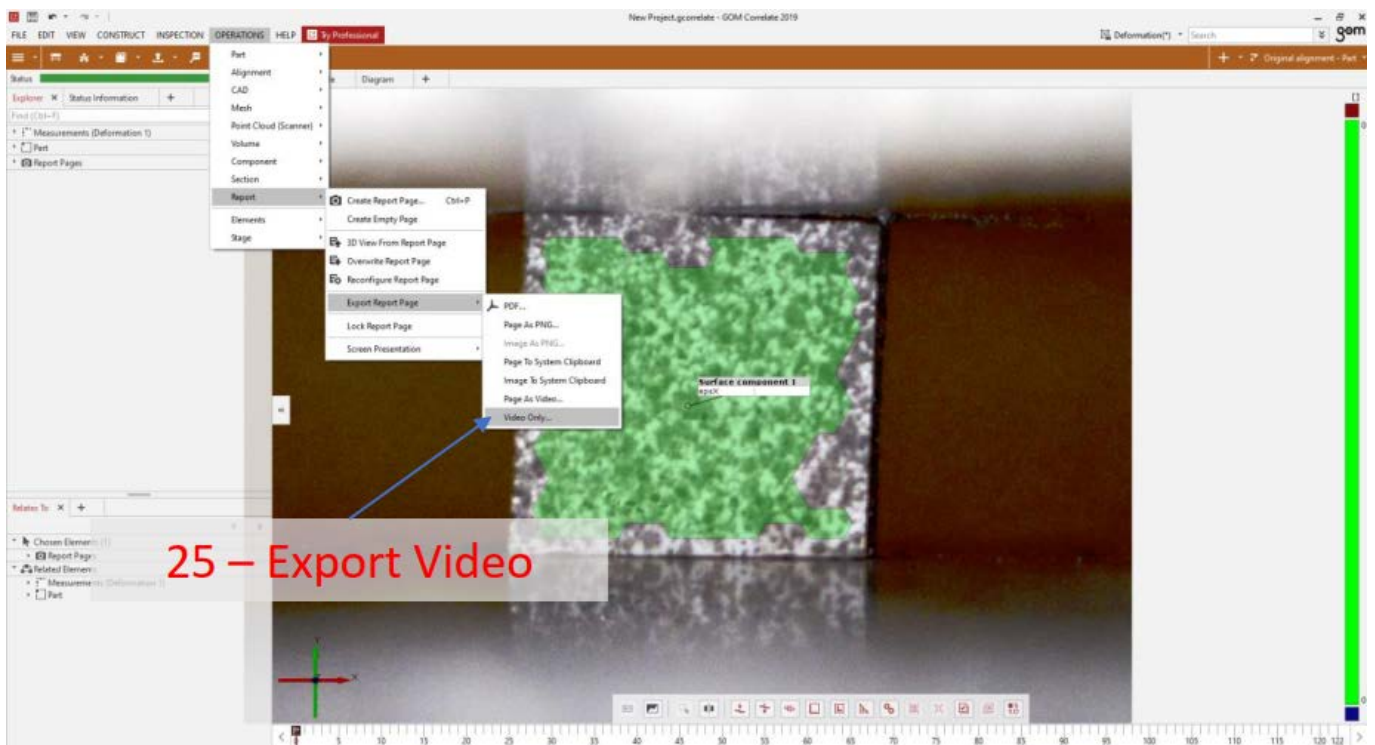
Продовження рисунка 2.9.



17. Як зображено на фото-інструкції обираємо Diagram, а потім Export.

18. Як зображено на фото-інструкції обираємо Create report на верхній панелі.

19. Створюємо 3D модель і діаграму деформації, потім – відео, натискаючи на панелі, як зображено на фото-інструкції.



20. Для експорту відео на верхній панелі обираємо OPERATIONS→Report→Export Report Page→Video Only...

За результатами отримуємо відео випробування та діаграму ступеня деформації.

2.2.2 Визначення характеристик при випробуванні на розтягування

Випробування виконується відповідно до пункту 2.2.1. З отриманого CSV - файлу ступеня деформації та діаграми розтягування отримаймо діаграму Stress-Strain, де напруження по осі Y, ступінь деформації по осі X, як показано на рисунку 2.10.

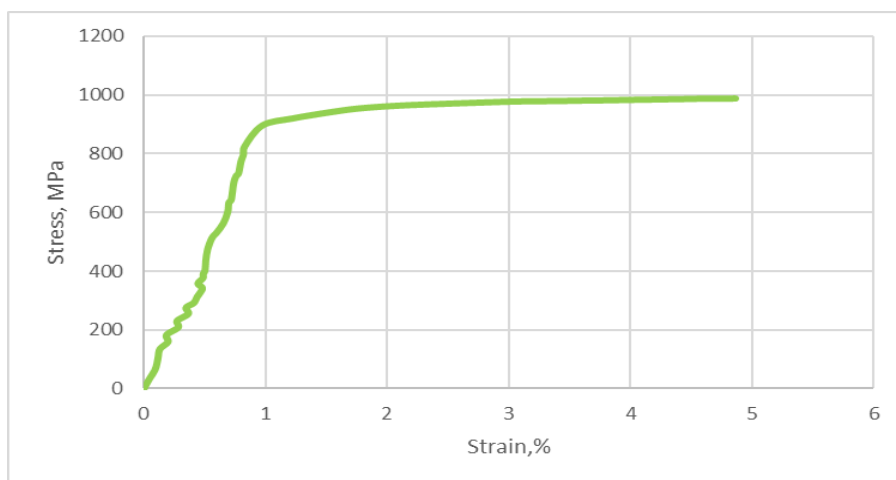


Рисунок 2.10 – Результати випробування на розтягування зразка

2.3 Geomagic ControlX

Geomagic ControlX – це професійне програмне забезпечення для контролю поверхні та розмірів, що пропонує передові, багатофункціональні інструменти [2]. Застосування даного програмного забезпечення дозволяє виконувати перевірку геометричних параметрів CAD – моделі (створеної в SolidWorks, AutoCAD, Fusion360, КОМПАС) з фактичними геометричними параметрами, отриманими після механічної обробки. Наприклад, зразок на розтягування – параметри конусності заготовки в робочій зоні та визначення відхилень геометрії від зазначеної на кресленні похибки. Розглянемо даний варіант більш детально (рис. 2.11).

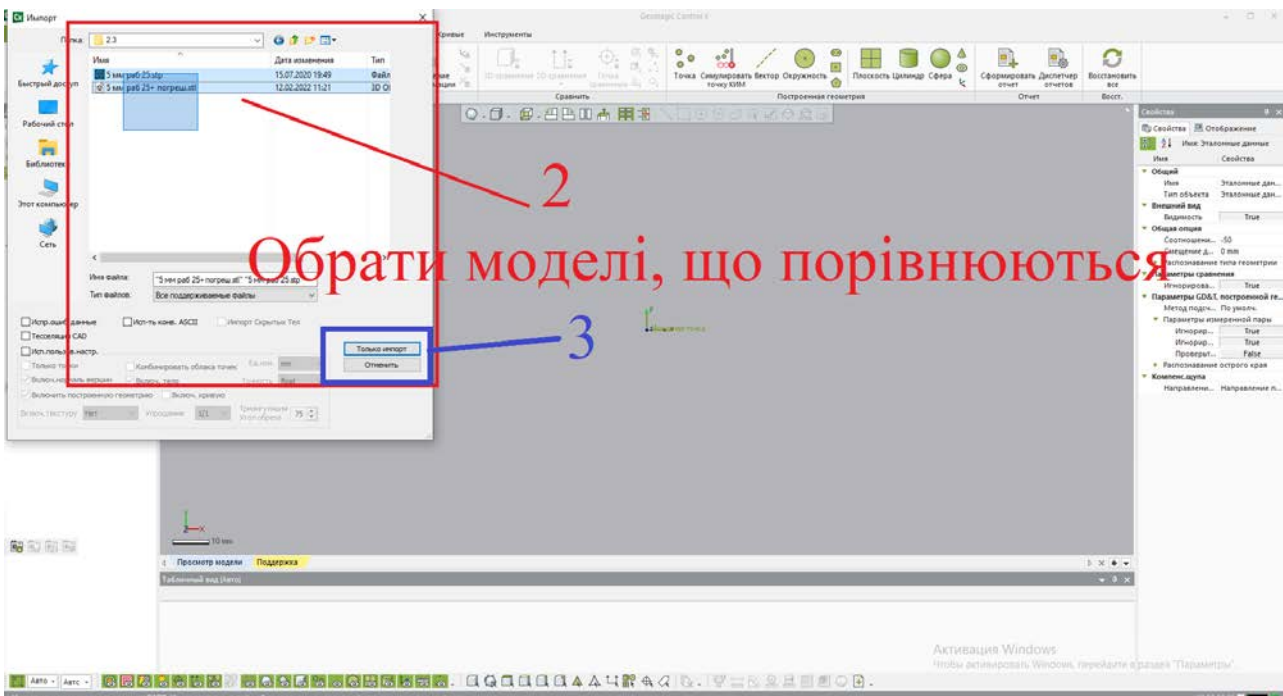
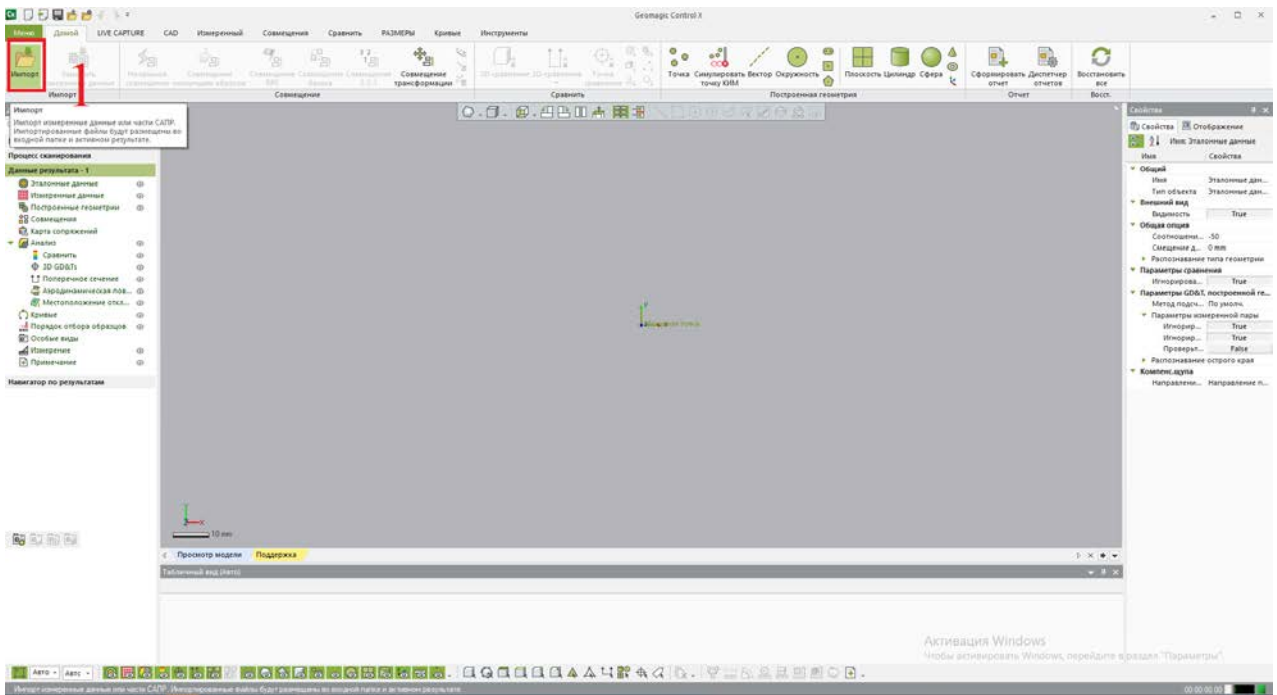
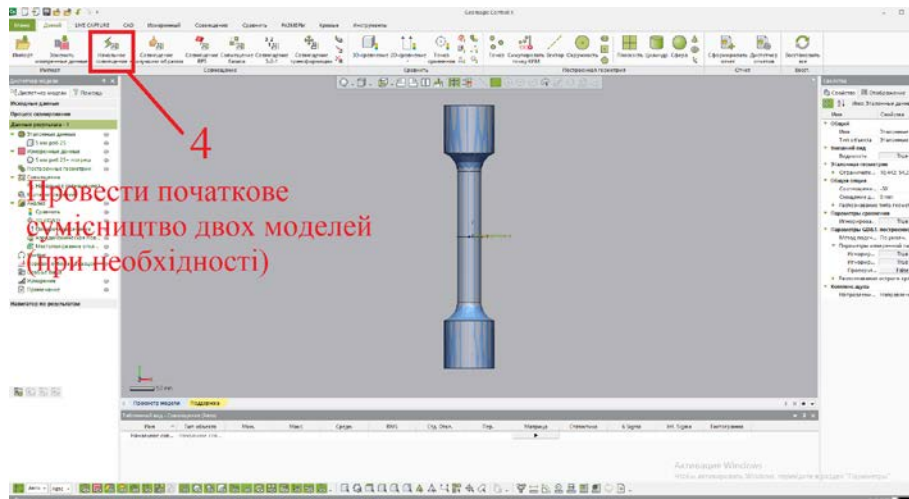


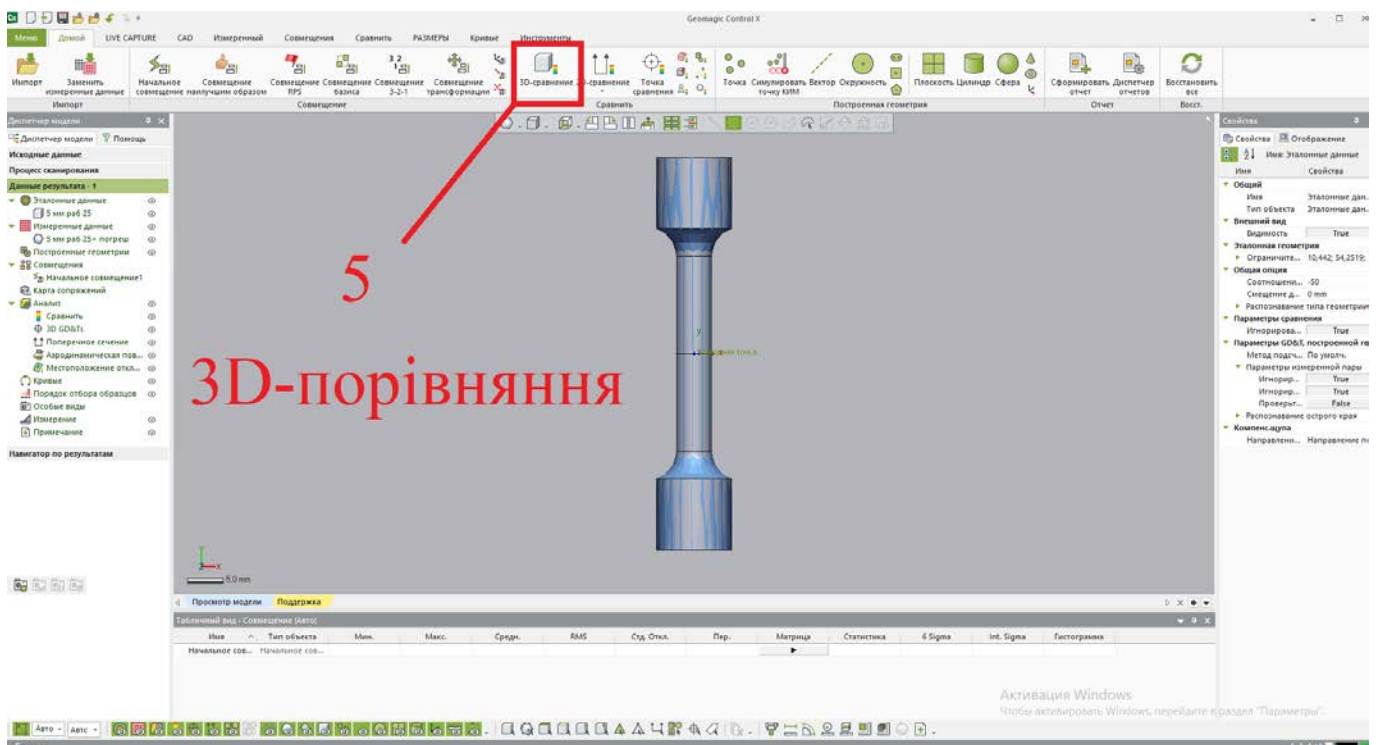
Рисунок 2.11 – Поетапне проведення перевірки геометричних параметрів зразків для випробування на розтягування з отриманням звіту

1. Після відкриття програми натиснути на «Імпорт».
2. Обрати файли моделей, що порівнюються. Обрати кнопку «Тільки імпорт» для завантаження файлів на верхній панелі.
3. Далі при необхідності провести початкове суміщення двох моделей.

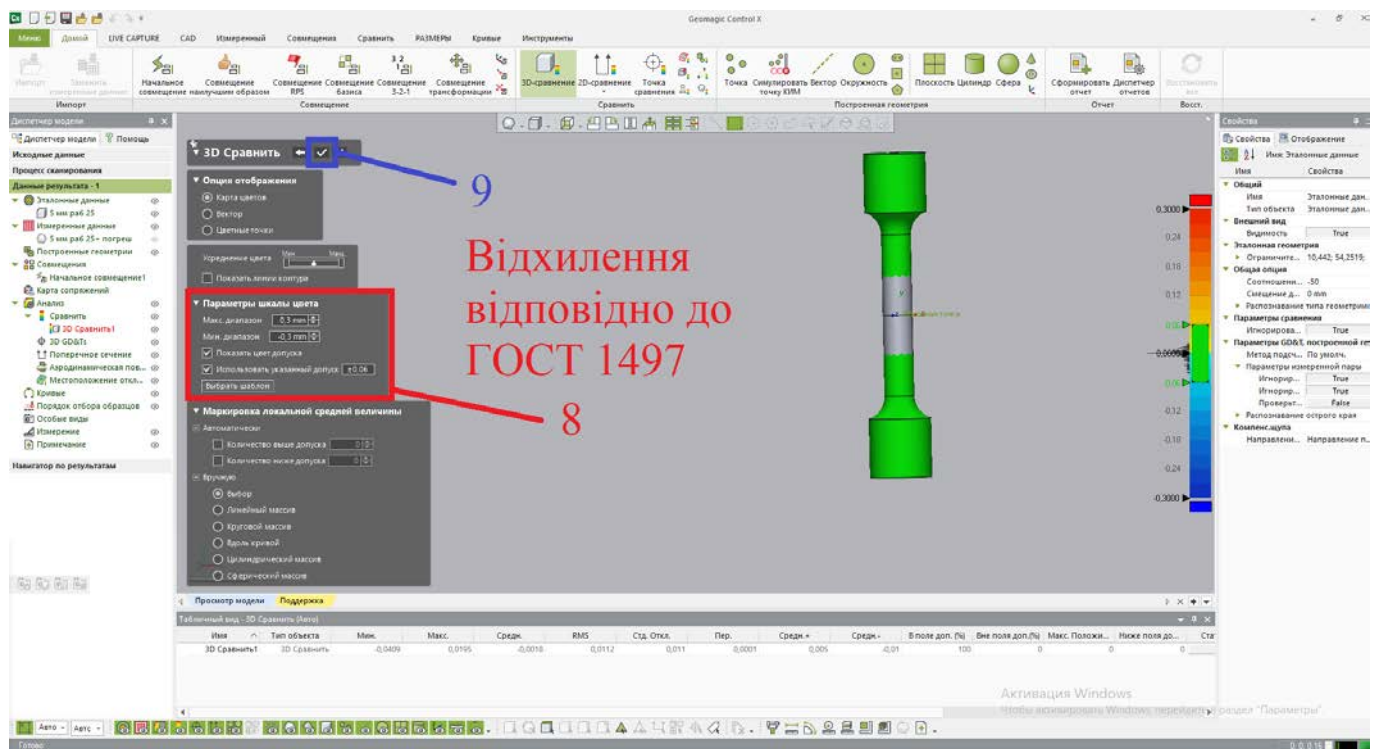
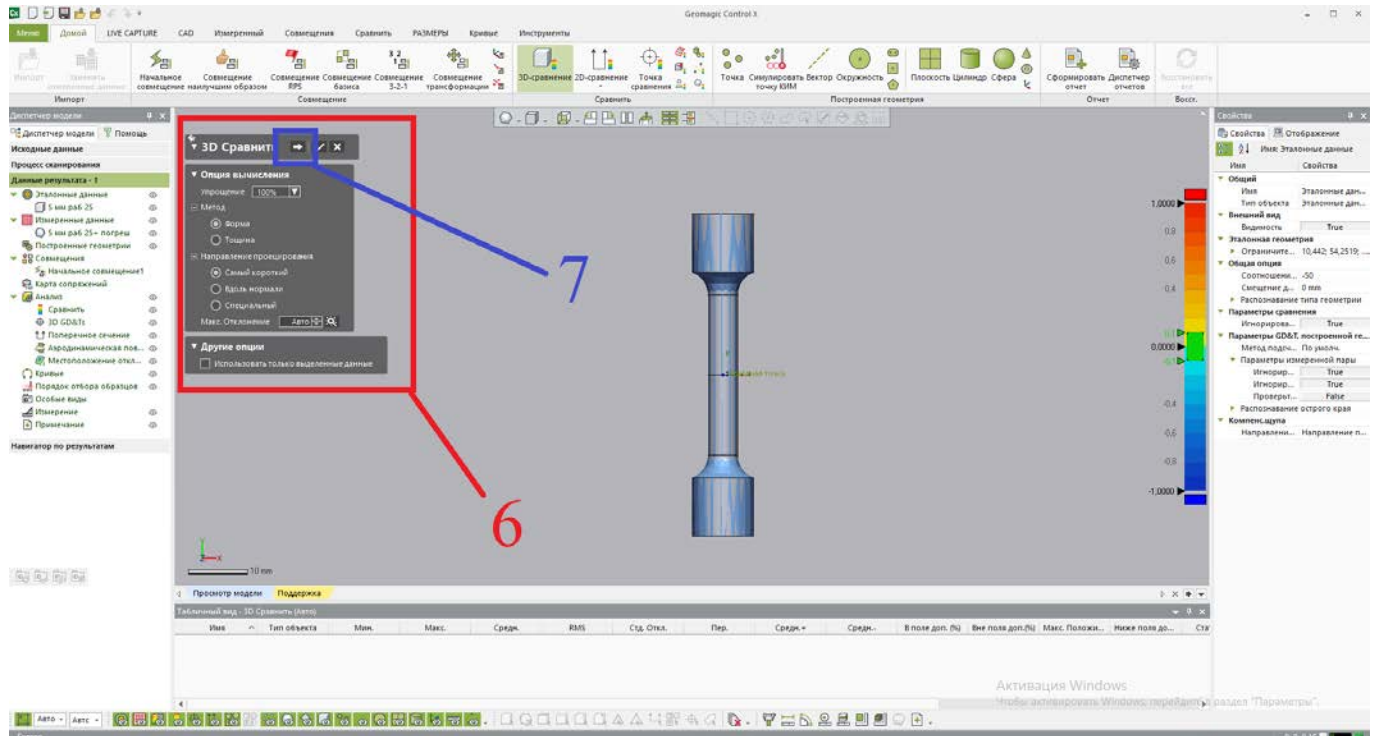
Продовження рисунка 2.11



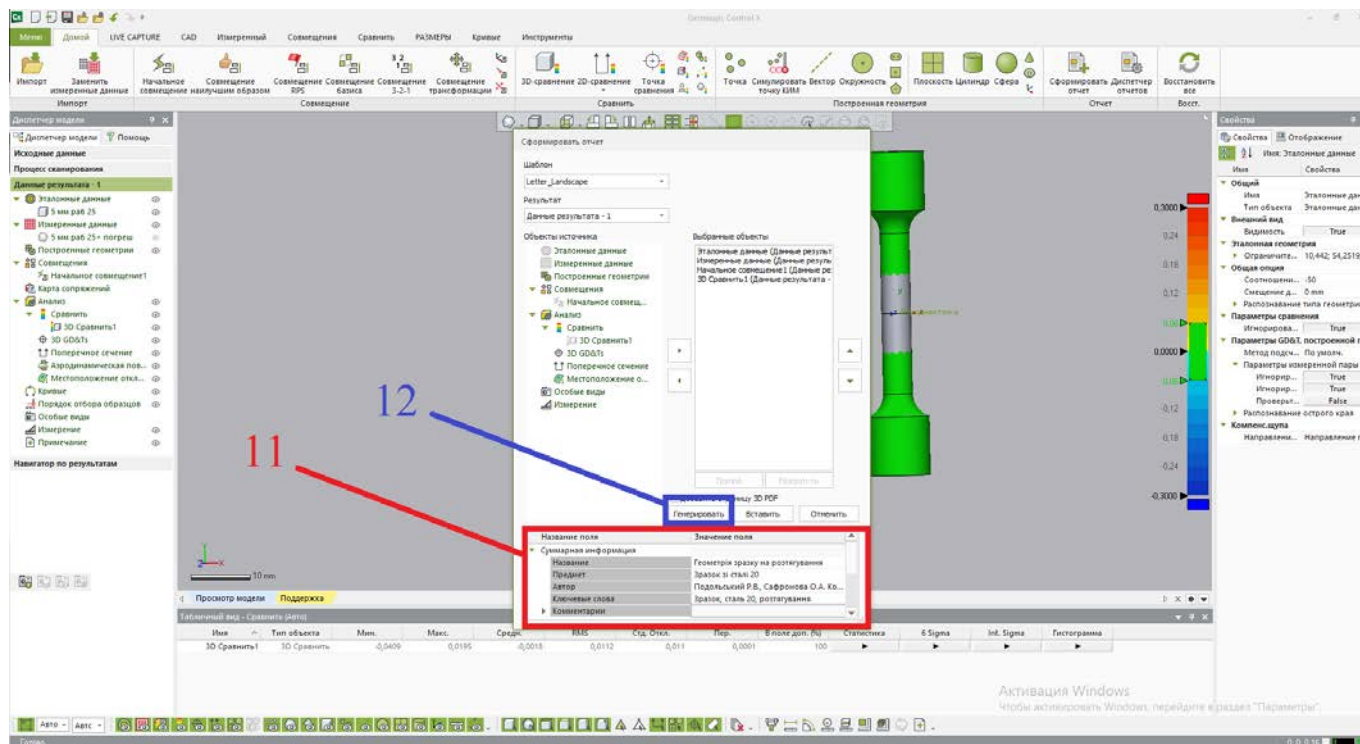
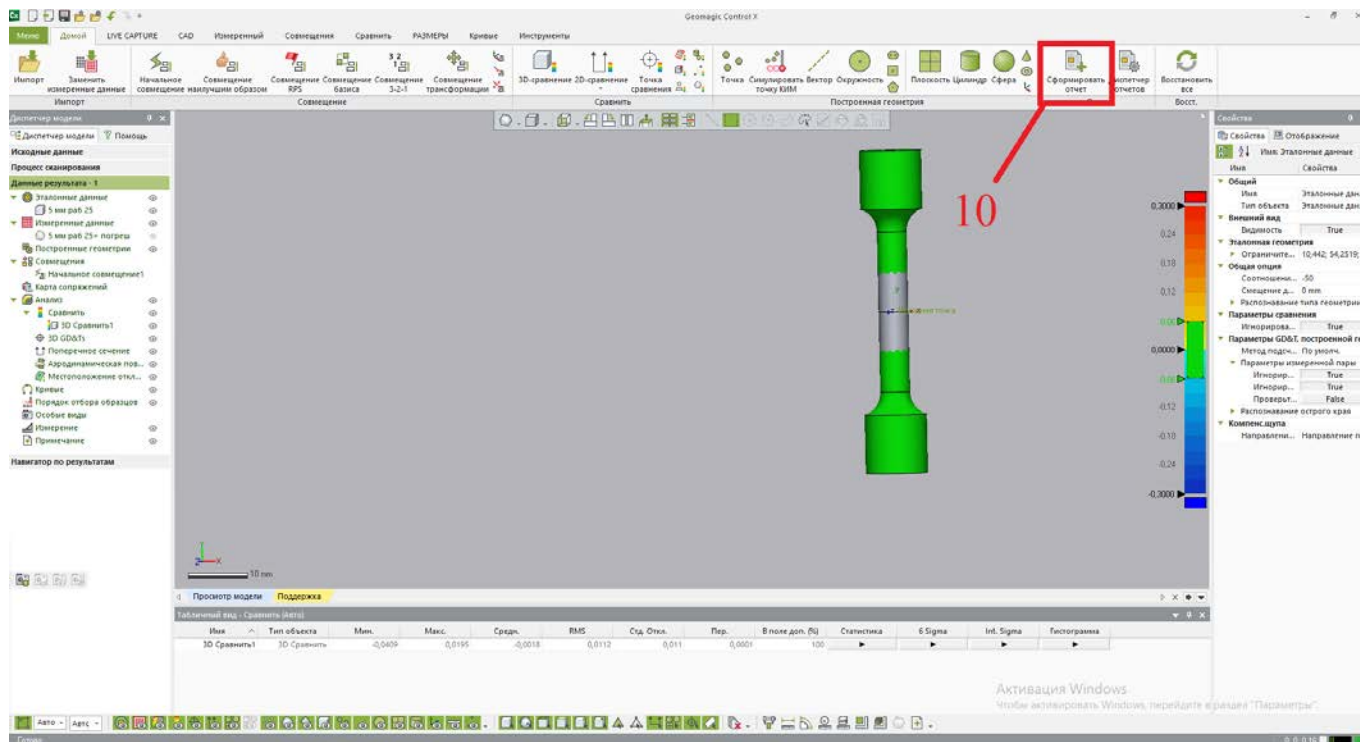
4. Обрати «3D порівняння» на верхній панелі.
5. З'явиться вікно «3D порівняння», де натискаємо на стрілку як зображено (крок 7–6) на фото-інструкції.
6. Вказати відхилення згідно з ГОСТом 1497 як зображено на фото-інструкції (крок 8).
7. Натискаємо знак «✓».
8. На верхній панелі обрати «Сформуувати звіт».
9. З'явиться вікно в якому необхідно заповнити необхідну інформацію в «Назва поля» і «Значення поля».
10. Обрати кнопку «Генерувати».



Продовження рисунка 2.11



Продовження рисунка 2.11

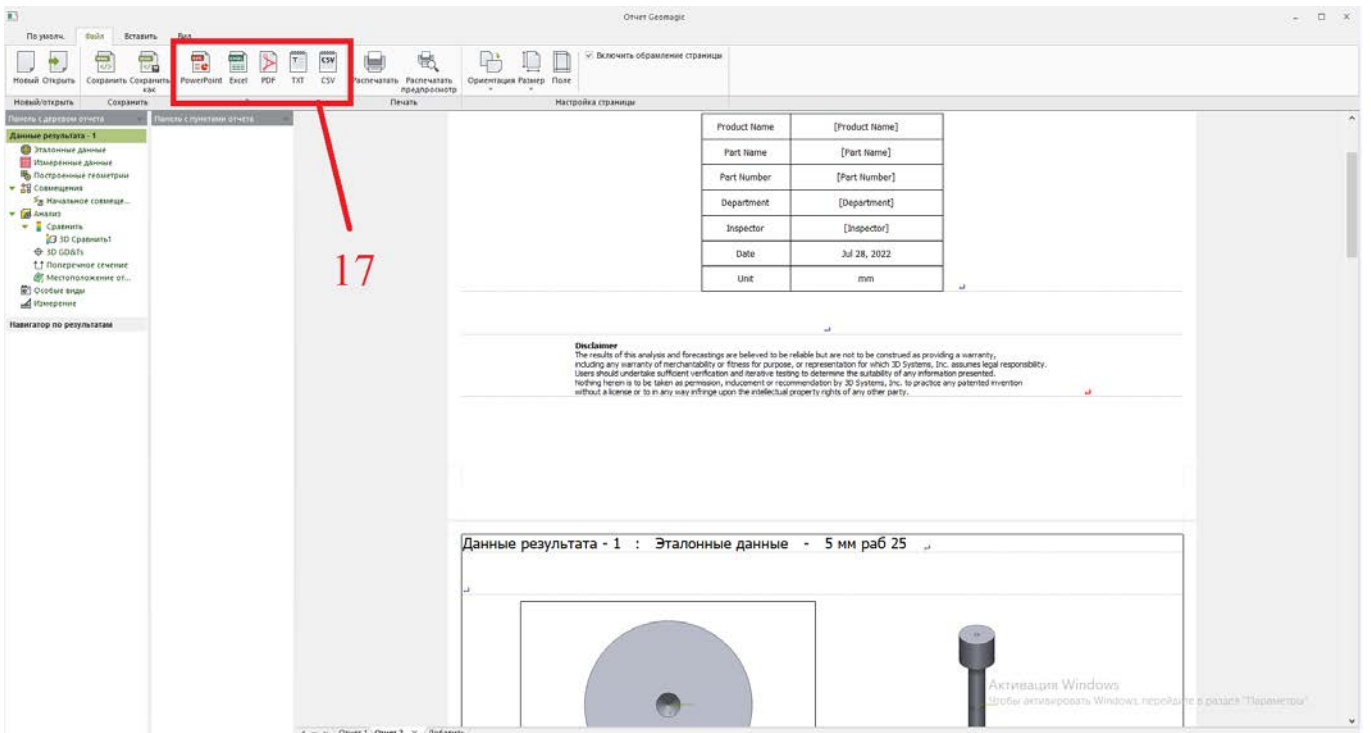
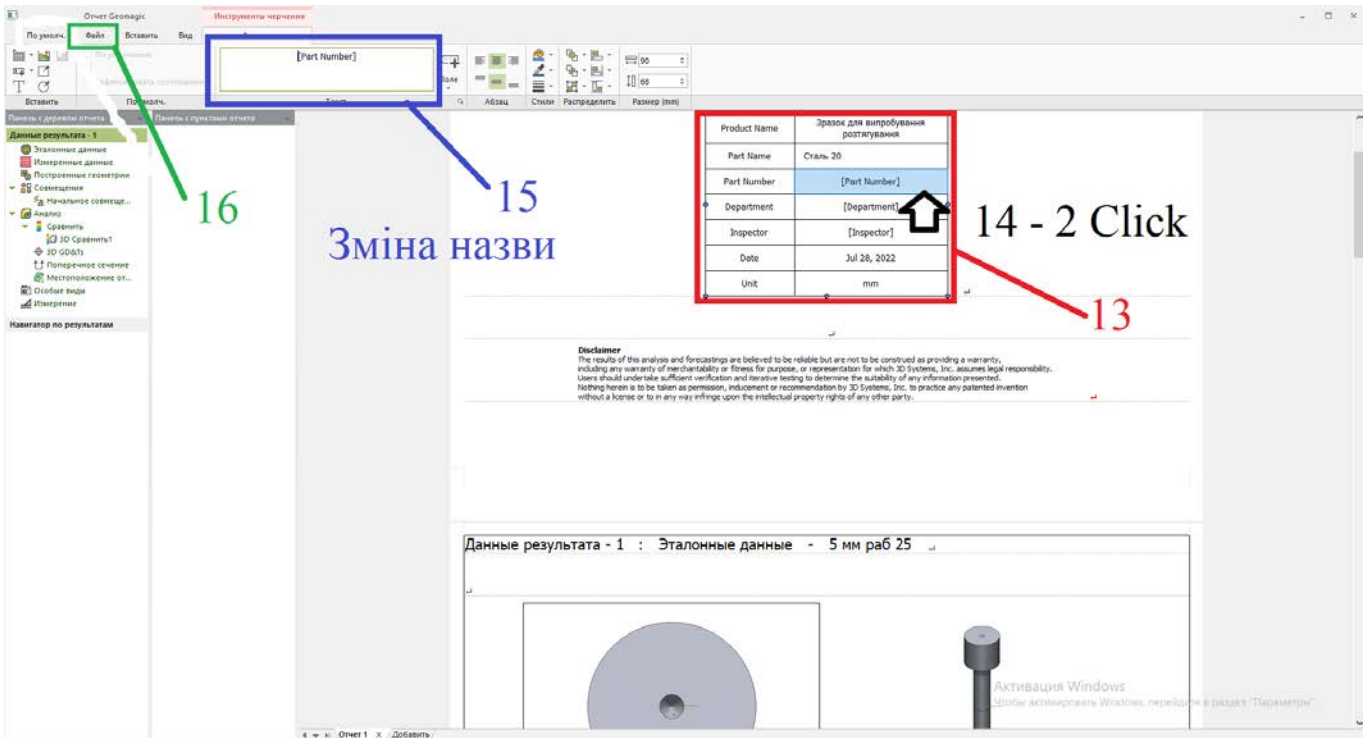


11. З'явиться вікно, де подвійним кліком натискаємо на [Part Number].

12. На верхньому полі обираємо [Part Number] і змінюємо назву.

13. На панелі інструментів обираємо пункт меню «Файл».

Продовження рисунка 2.11



14. Далі як зображено на фото-інструкції (крок 17) для скачування результатів порівняння обирається в заданому користувачем форматі PowerPoint, Excel, PDF, TXT чи CSV для скачування звіту.

В результаті перевірки параметрів отримано звіт про відхилення від геометричних параметрів стандарту з врахуванням регламентованої похибки (рис. 2.12).

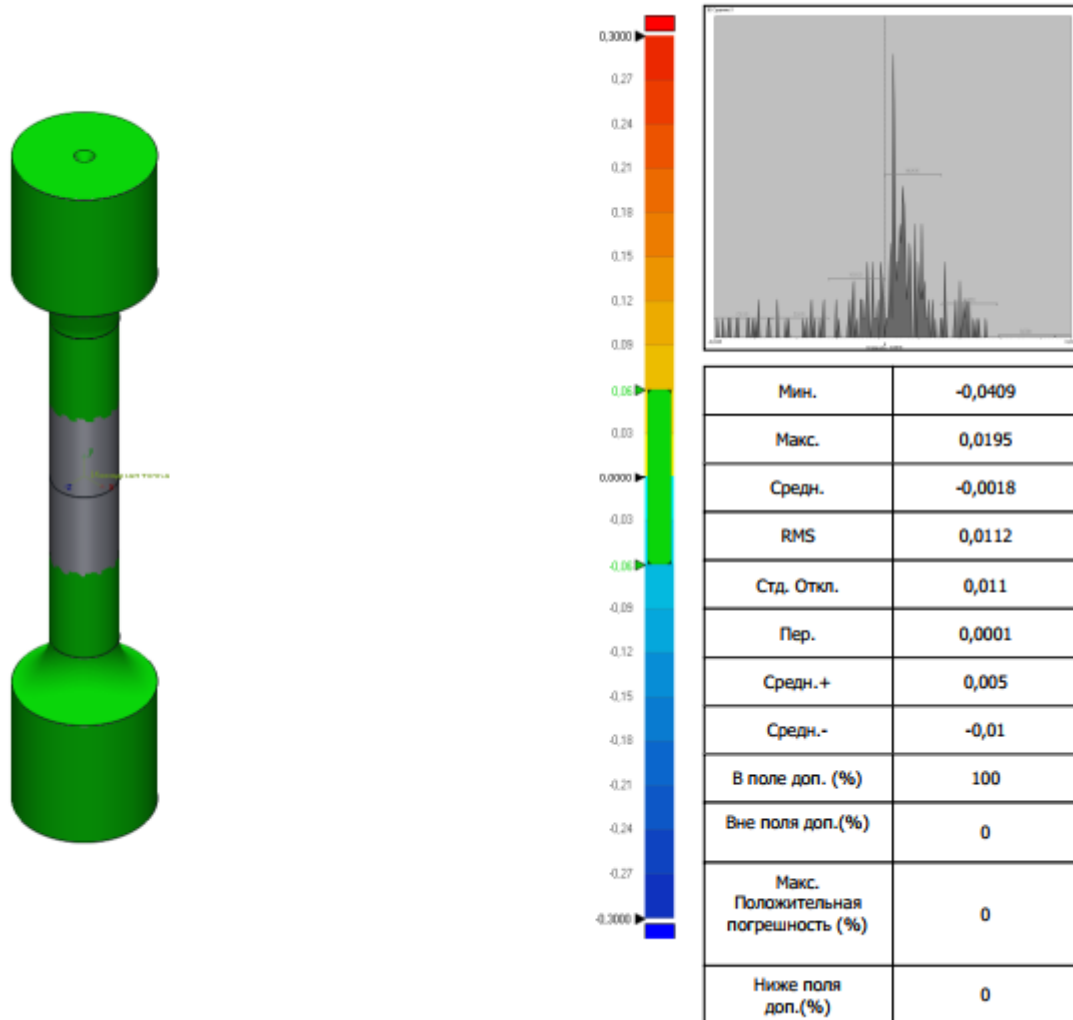


Рисунок 2.12 – Фрагмент звіту про перевірку геометричних параметрів

2.4 WebPlotDigitizer

WebPlotDigitizer – це безкоштовний програмний пакет, що застосовується для реконструкції візуалізації даних з зображення, для того, щоб отримати числові дані, що лежать в основі. Даний програмний пакет працює з великим спектром діаграм, застосовані алгоритми спрощують встановлення великої кількості точок даних [3].

Велика кількість діаграм в наукових публікаціях лише в графічному вигляді без збереження числових даних. При дослідницькій роботі та аналізі є велика необхідність в отриманні числових даних діаграм з метою подальшого

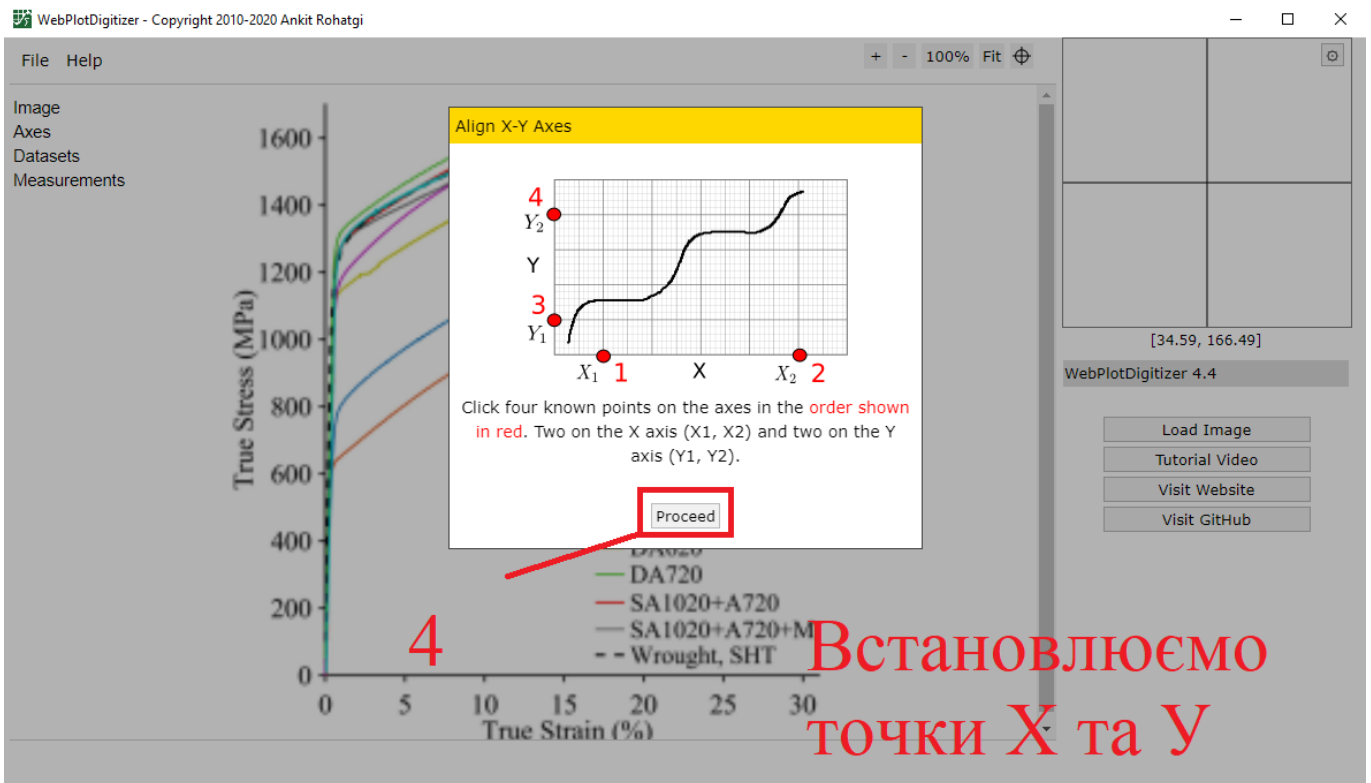
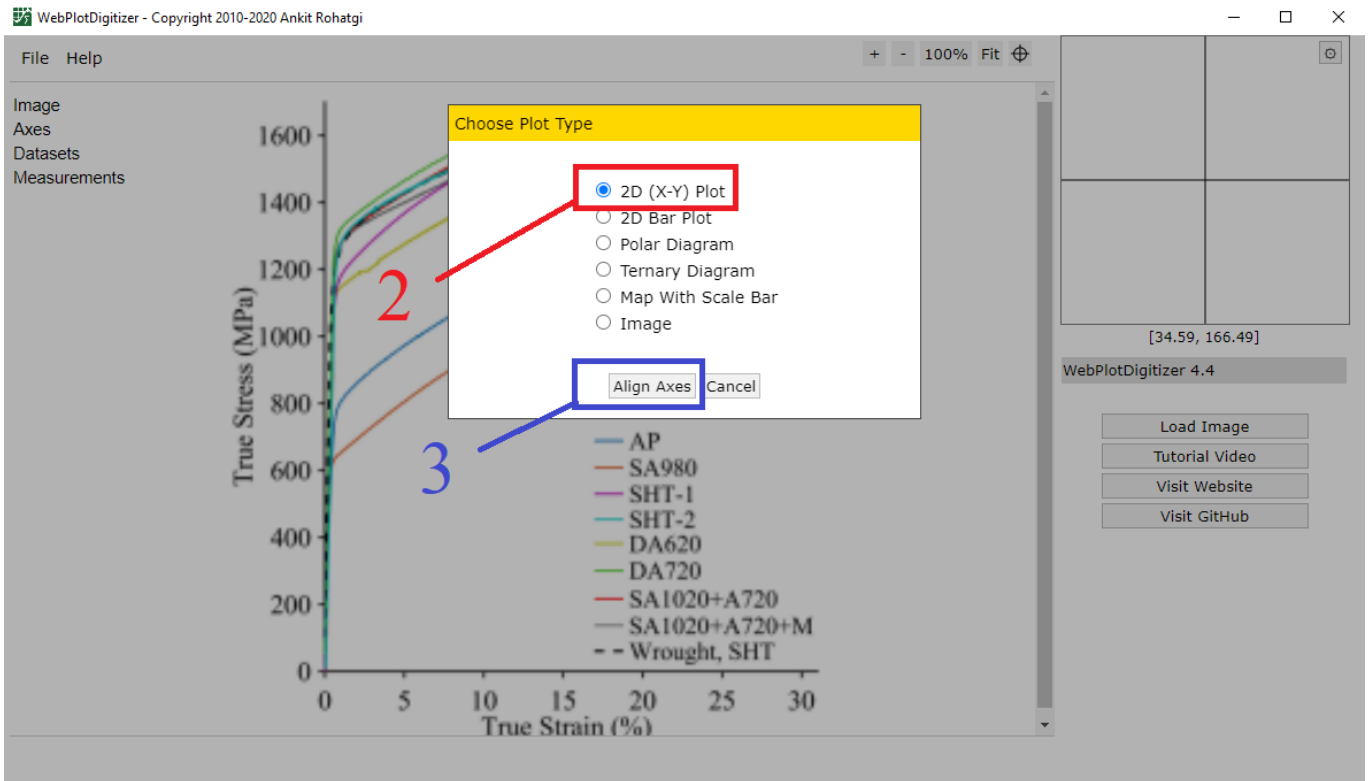
аналізу. Наприклад, для порівняння результатів інших дослідників (Gallmeyer et. al.) зі своїми даними для демонстрації відмінності чи збіжності значень (рис. 2.13).

1. Після відкриття програми натиснути кнопку Load Image.
2. З'явиться вікно Choose Plot Type. Натискаємо на Align Axes.
3. Встановлюємо точки X та Y, натискаємо Proceed.
4. Як на фото-інструкції (кроки 5, 6, 7, 8) встановлюємо точки X1, Y1, X2, Y2.
5. Після встановлення точок з'явиться вікно X and Y Axes Calibration і встановлюємо параметри, які зображені на фото-інструкції (крок 9).
6. Як на фото-інструкції в Display Color обираємо Box Color і Foreground Color (кроки 10–11).
7. Далі встановлюємо колір за кодом RGB і натискаємо Done (кроки 12–13).
8. Далі виділяємо область контролю (крок 14). Обираємо Filter Colors (крок 15).
9. Натискаємо Run (крок 16).
10. Далі прибираємо зайві точки даних Delete Point (D) (крок 17).
11. Натискаємо View Data (крок 18).
12. З'явиться вікно Acquired Data і натискаємо Download.CSV (крок 18) для завантаження результату.

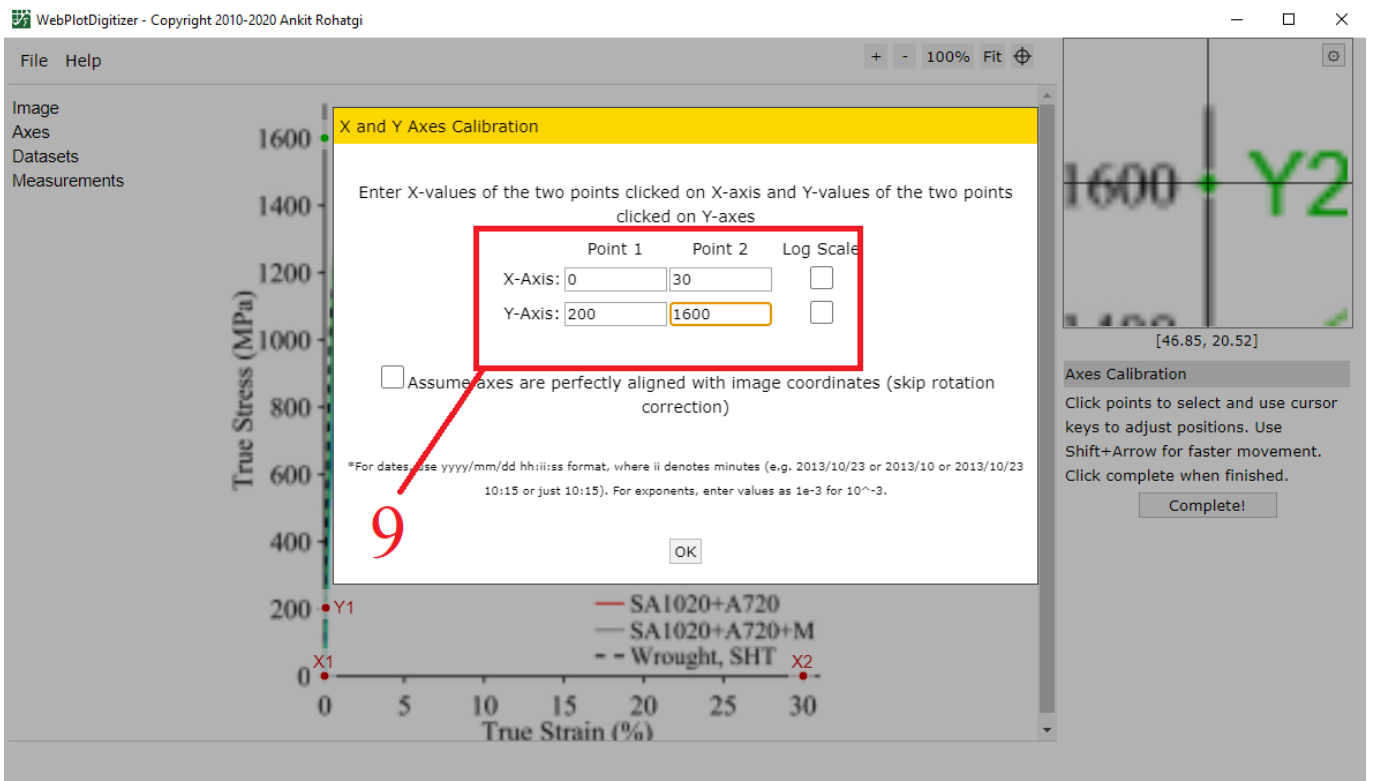
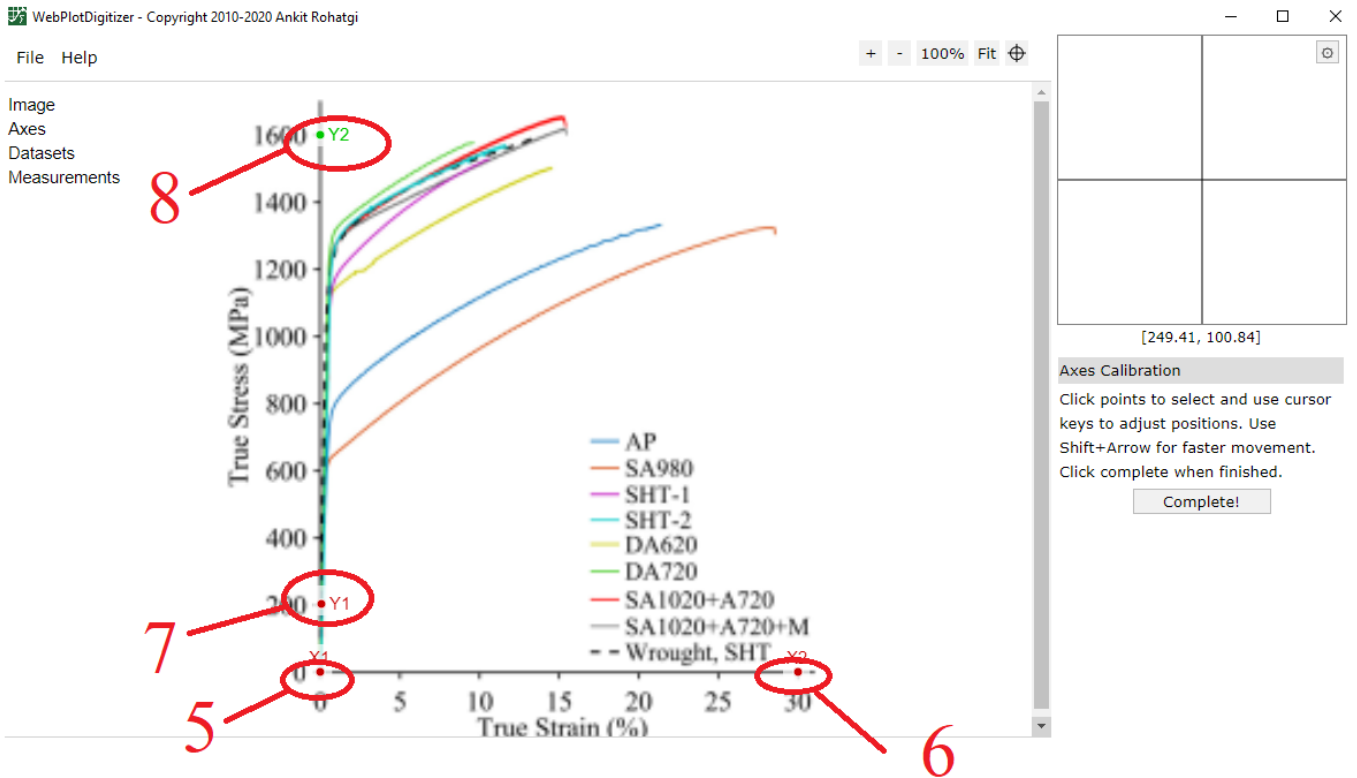


Рисунок 2.13 – Поетапне отримання числових даних з візуалізованих даних

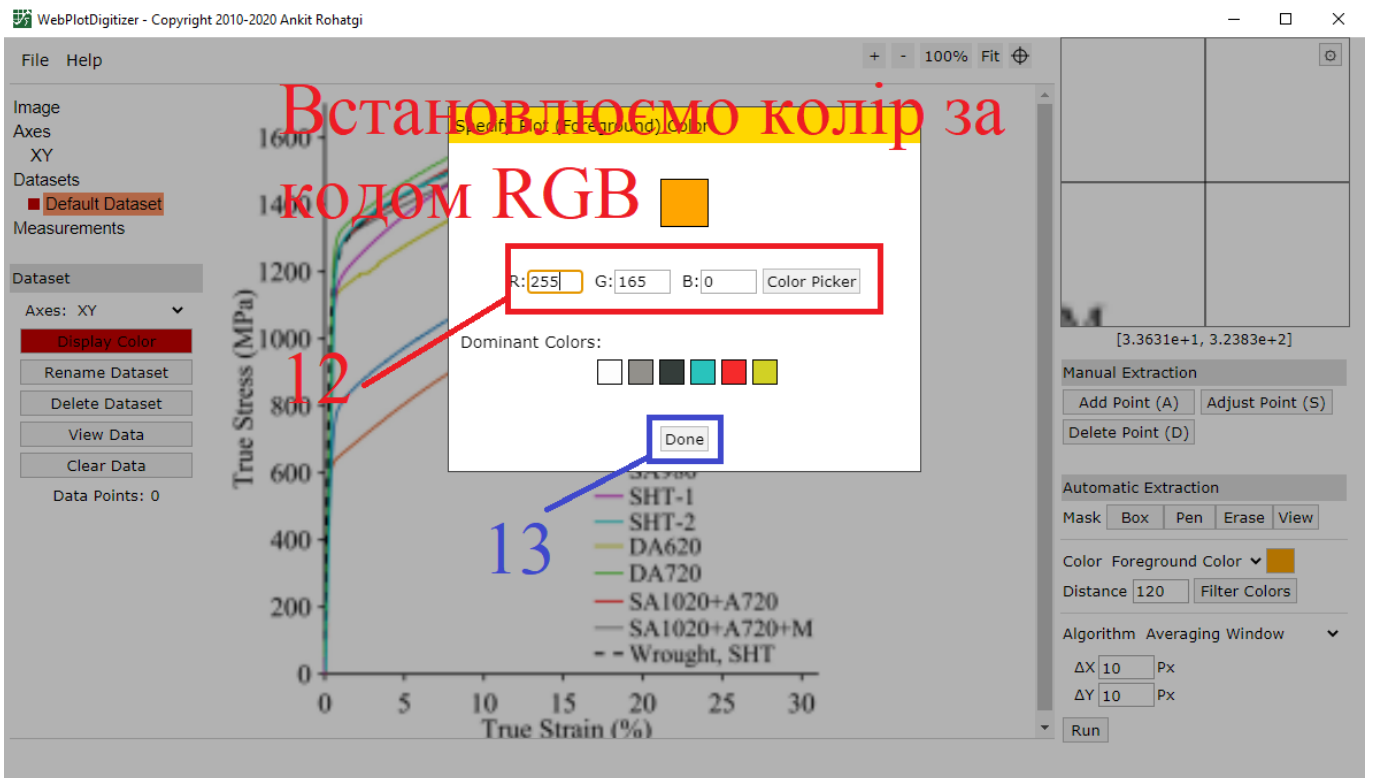
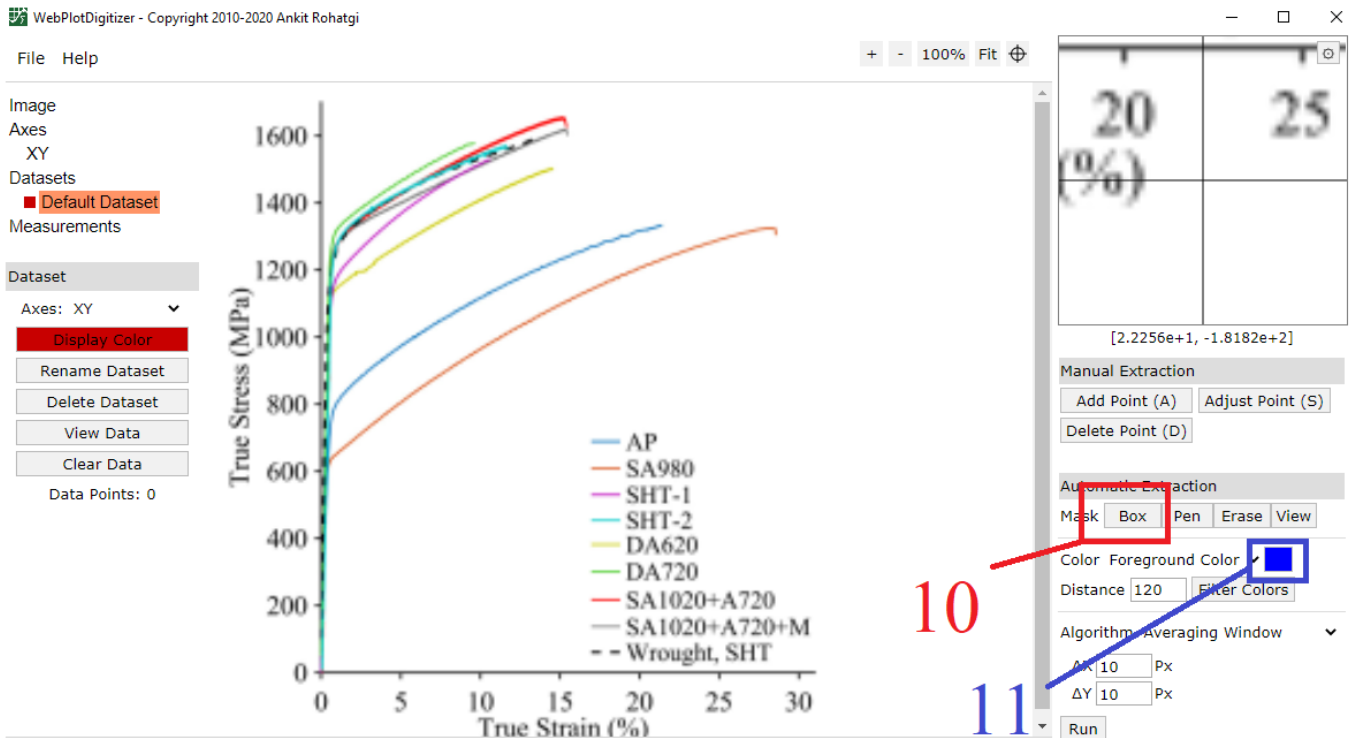
Продовження рисунка 2.13



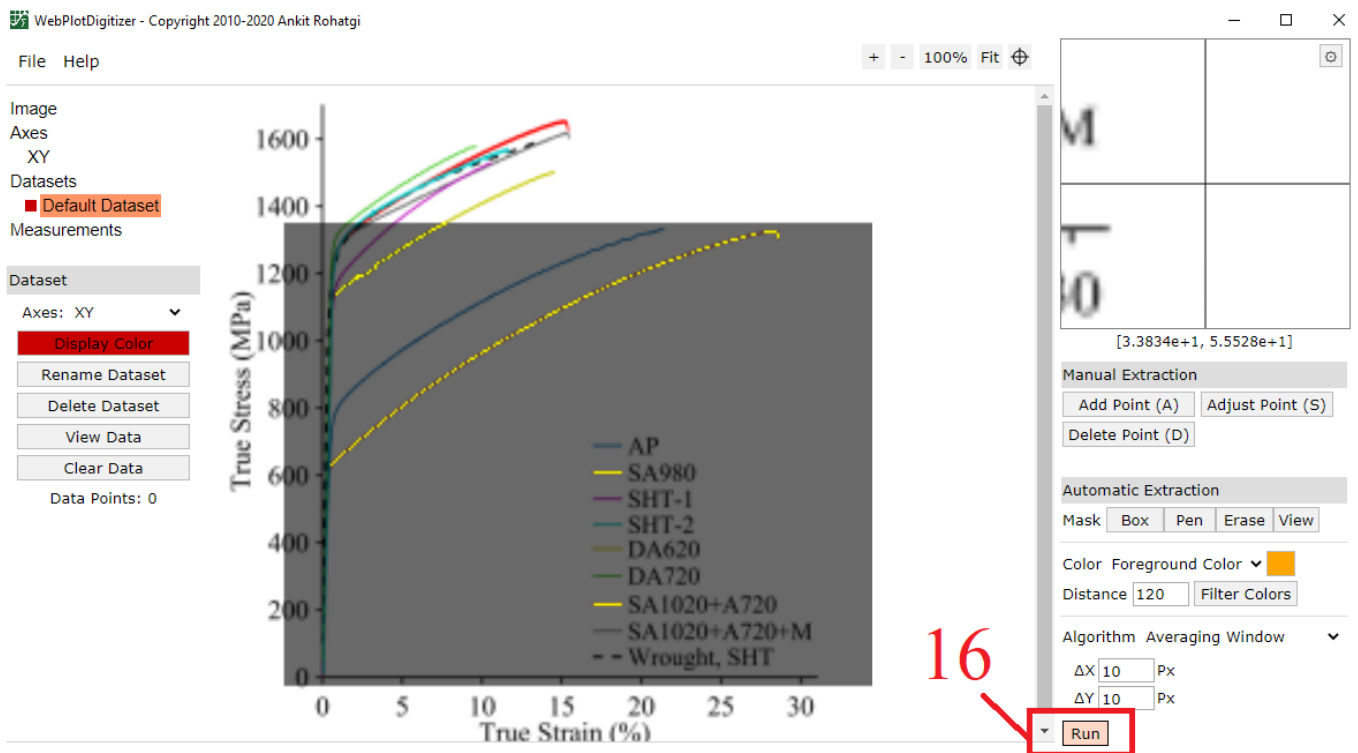
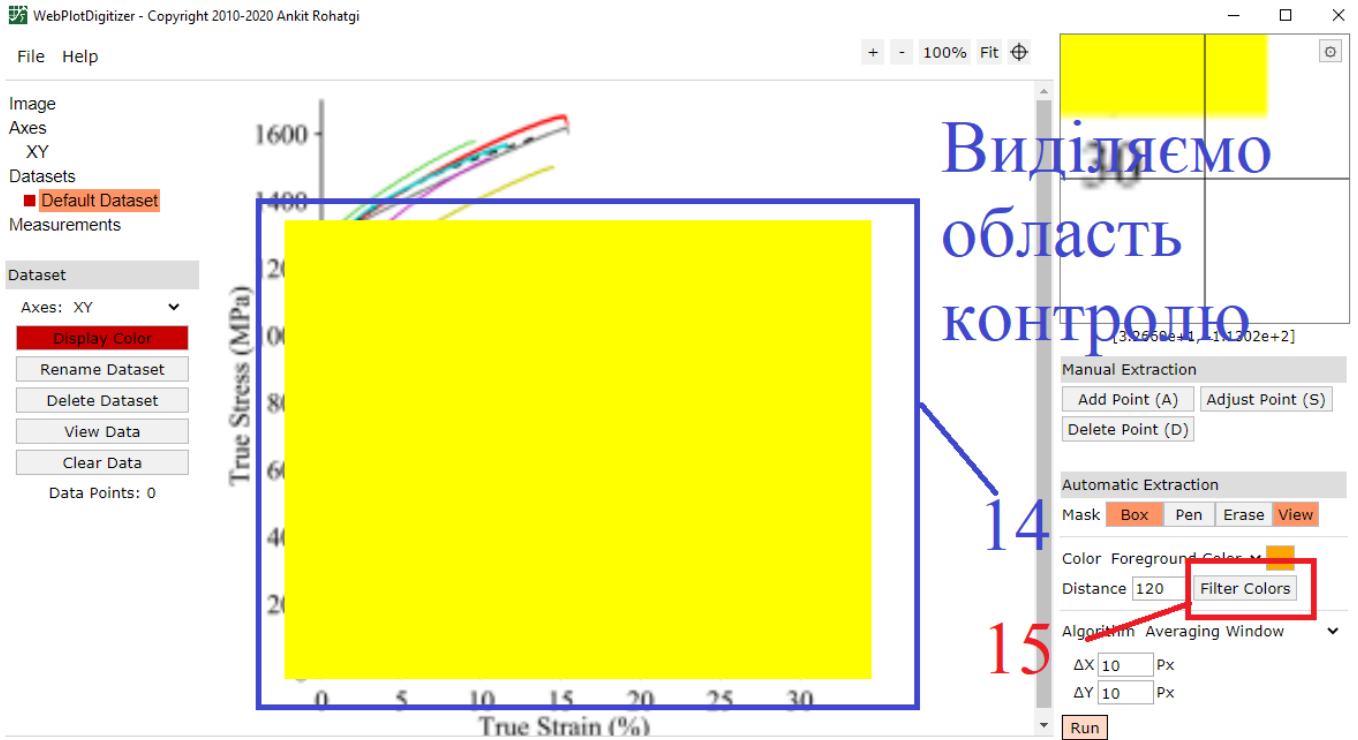
Продовження рисунка 2.13



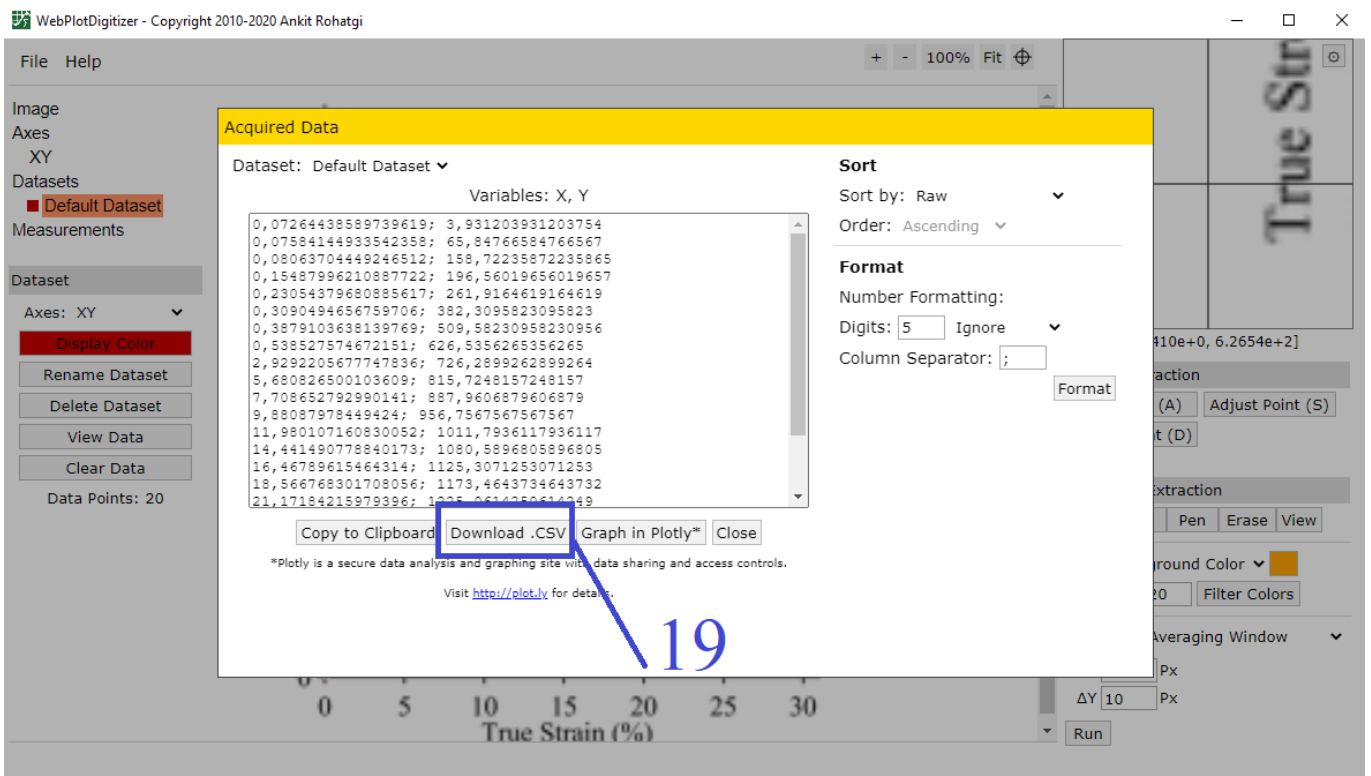
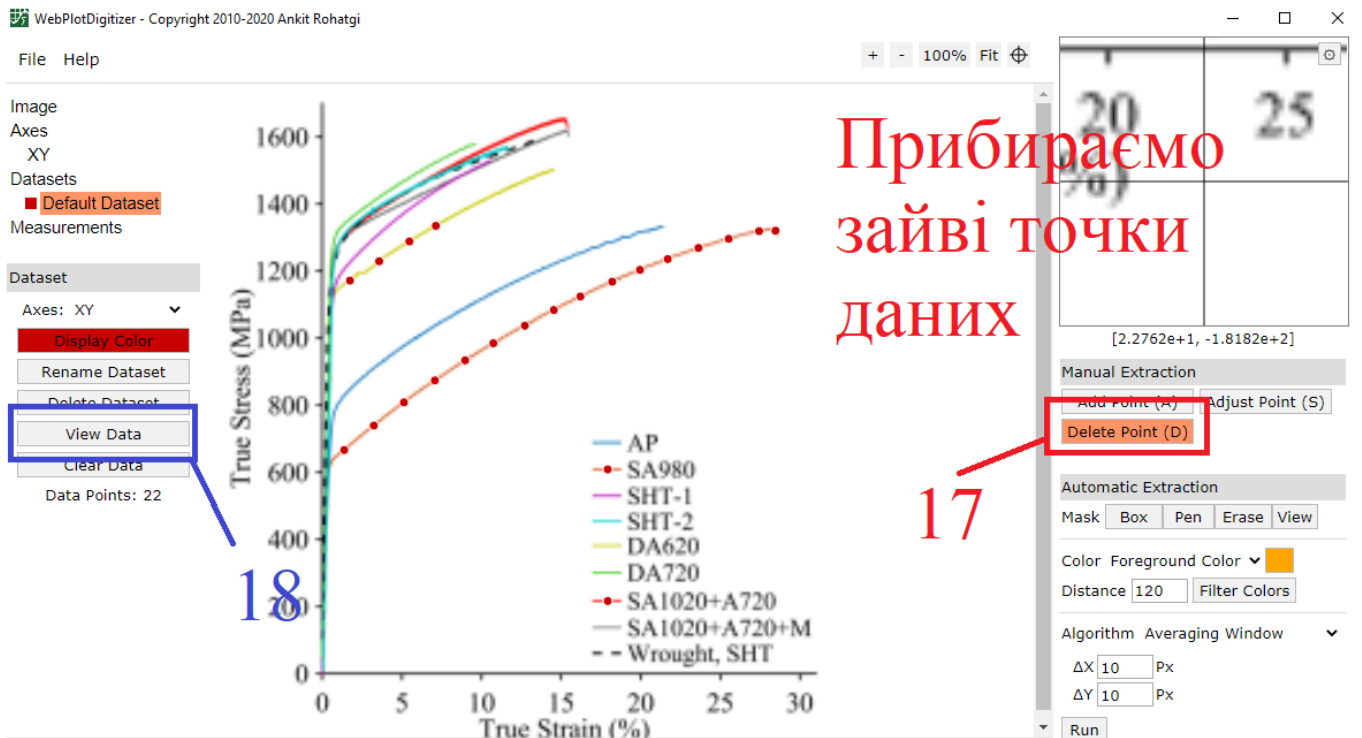
Продовження рисунка 2.13



Продовження рисунка 2.13



Продовження рисунка 2.13



Результат порівняння досліджень представлено на рисунку 2.14.

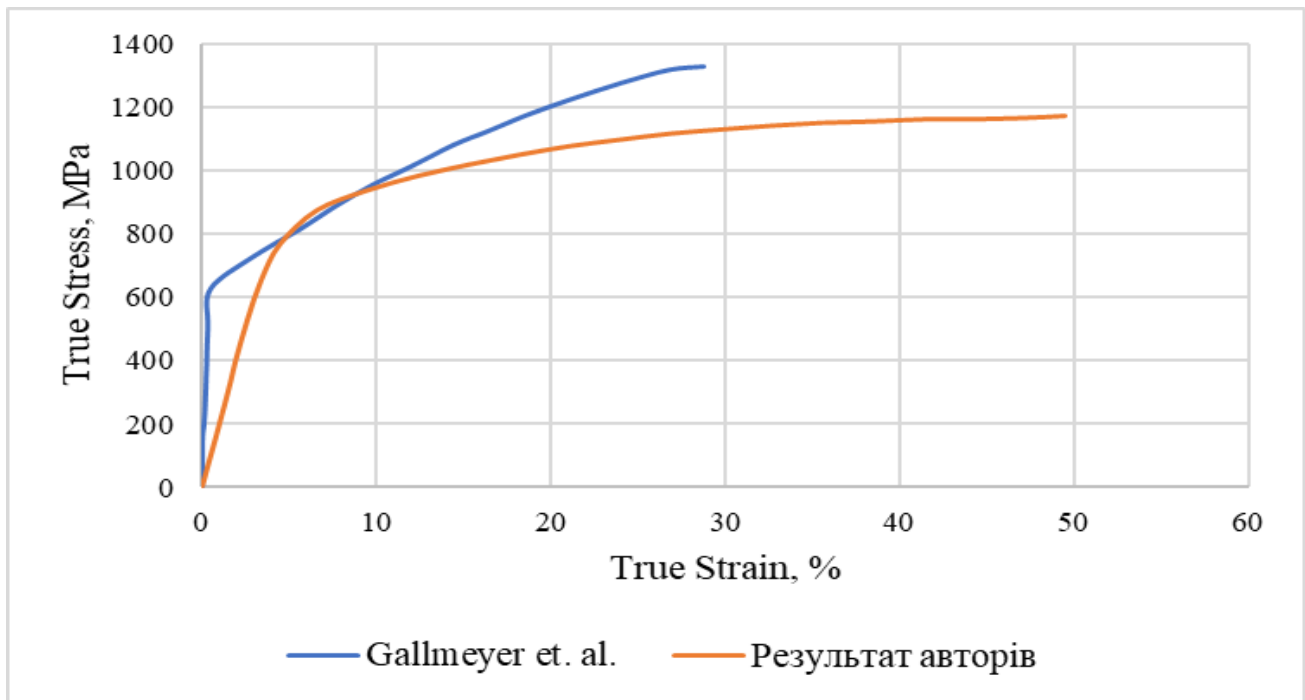


Рисунок 2.14 – Результати досліджень Gallmeyer et. al. та авторів методики сплаву Inconel 718.

2.5 JMatPRO

JMatPRO – програмне забезпечення для моделювання широкого спектра властивостей багатоконпонентних сталей та сплавів, що застосовуються у виробництві. За допомогою JMatPro користувач може з застосуванням математичного та комп'ютерного моделювання визначати такі властивості для сталей та сплавів, як [4]:

- Стабільний та метастабільний стан;
- Кристалізація та властивості після кристалізації;
- Механічні властивості;
- Термо-фізичні та фізичні властивості;
- Фазові перетворення;
- Хімічні властивості.

JMatPro являє собою інтерфейс користувача на основі мови програмування Java та розрахункові модулі на основі мови програмування C/C++. JMatPro може бути запущений на будь-якій операційній системі із сімейства Windows (починаючи з Windows 98) як на малопотужних персональних комп'ютерах, так і на сучасних багатопроцесорних обчислювальних машинах [4].

Адекватний математичний опис властивостей матеріалу – найважливіша частина успішного моделювання будь-якого процесу, що потребує значних

ресурсів для проведення експериментальних досліджень на спеціалізованому випробувальному обладнанні. Одним із поширених шляхів скорочення витрат на експериментальні дослідження є наповнення баз даних властивостей матеріалів з відкритих літературних джерел та пошук аналогів матеріалів. Основними недоліками цього шляху є необхідність врахування способу отримання тих чи інших матеріалів, що змінюються з кожним роком, які без сумнівів впливають на їх властивості [4]. Основні можливості JMatPro представлені в таблиці 2.1 [4].

Для прикладу розглянемо умови коректного застосування даного програмного комплексу з застосуванням попередньо вивчених методів аналізу зеренної структури, а саме пункт (п. 2.1.3). У якості об'єкту дослідження візьмемо сплав Inconel 718 різного способу виробництва, а саме, за традиційною технологією виробництва та технологією вибіркового лазерного плавлення (далі ВЛП-технологія). За результатами попереднього дослідження відповідно до п. 2.1.3 встановлено, що розмір дійсного зерна традиційно виготовленого Inconel 718 складає близько 150–200 мкм, розмір дійсного зерна Inconel 718, виготовленого за ВЛП-технологією – близько 17–24 нм [5].

На рисунку 2.15а представлено схему перетворення та виділення фаз в сплаві Inconel 718 традиційного способу виготовлення, рисунок 2.15б показує промодельовану відповідно для Inconel 718 за ВЛП-технологією. З рисунку видно, що інкубаційний період виділення фаз у Inconel 718 за ВЛП-технологією скорочується і, таким чином, це потребує зменшення часу перебування у високотемпературній області для запобігання надмірного виділення фаз.

Таблиця 2.1 – Основні можливості JMatPro [4].

		Сплави										
		Al	Mg	Чавуни	Сталі	Нержавіючі сталі	Ni	Co	Ti	Zr	Припої	Cu
Фазові стани	Діаграми стійкого та нестійкого стану	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Оцінка метастабільного стану	✓										
Фізичні властивості	Стандартні фізичні властивості	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Енергія дефекту упаковки				✓	✓	✓	✓				
	Співвідношення об'єму γ і γ' фази						✓					
	Магнітна проникність				✓							
Кристалізація	Фазові перетворення та фізичні властивості	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Криві охолодження	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Міцність виливки	✓		✓	✓							
	Гомогенність	✓	✓				✓	✓	✓	✓		
Механічні властивості	Границя плинності/твердість за кімнатної температури				✓	✓	✓	✓				
	Границя плинності/твердість за високої температури				✓	✓	✓	✓				
	Співвідношення між границею плинності та твердістю				✓	✓	✓	✓				
	Напруження течії за кімнатної температури				✓	✓	✓	✓				
	Напруження течії за високих температур				✓	✓	✓	✓				
	Питома повзучість і руйнування					✓	✓	✓	✓			
	Границя міцності					✓	✓	✓	✓			
	Твердість за методом торцевого гарту				✓							
	Втомна міцність				✓	✓	✓	✓				
	Границя плинності при гартуванні T5/T6	✓										
Фазові перетворення	ТТТ/ССТ діаграми	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
	ТТА діаграми				✓							
	Властивості та фазовий склад після витримки в аустенітній ділянці				✓							
	Коефіцієнт зміни пластичності матеріалу при фазових перетвореннях				✓							
	Діаграми фазових перетворень в ізотермічних умовах	✓			✓	✓	✓	✓	✓			
	Властивості залежно від швидкості охолодження				✓				✓	✓		
	Температура мартенситного перетворення				✓	✓			✓			
	Напруження, пов'язані з мартенситним перетворенням				✓	✓						
	Товщина шару при цементації				✓							
	Співвідношення γ/γ'' фаз						✓					
Експорт даних у САЕ пакети	Об'ємна частка рекристалізованого обсягу та середній розмір зерна після гарячої прокатки				✓							
	Розмір зерна після термообробки							✓				
	Дані для моделювання процесів обробки металів тиском				✓	✓	✓	✓				
	Дані для розрахунків на міцність	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Експорт даних у САЕ пакети	Дані для моделювання процесів зварювання та термічної обробки				✓							
	Дані для моделювання процесів лиття	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

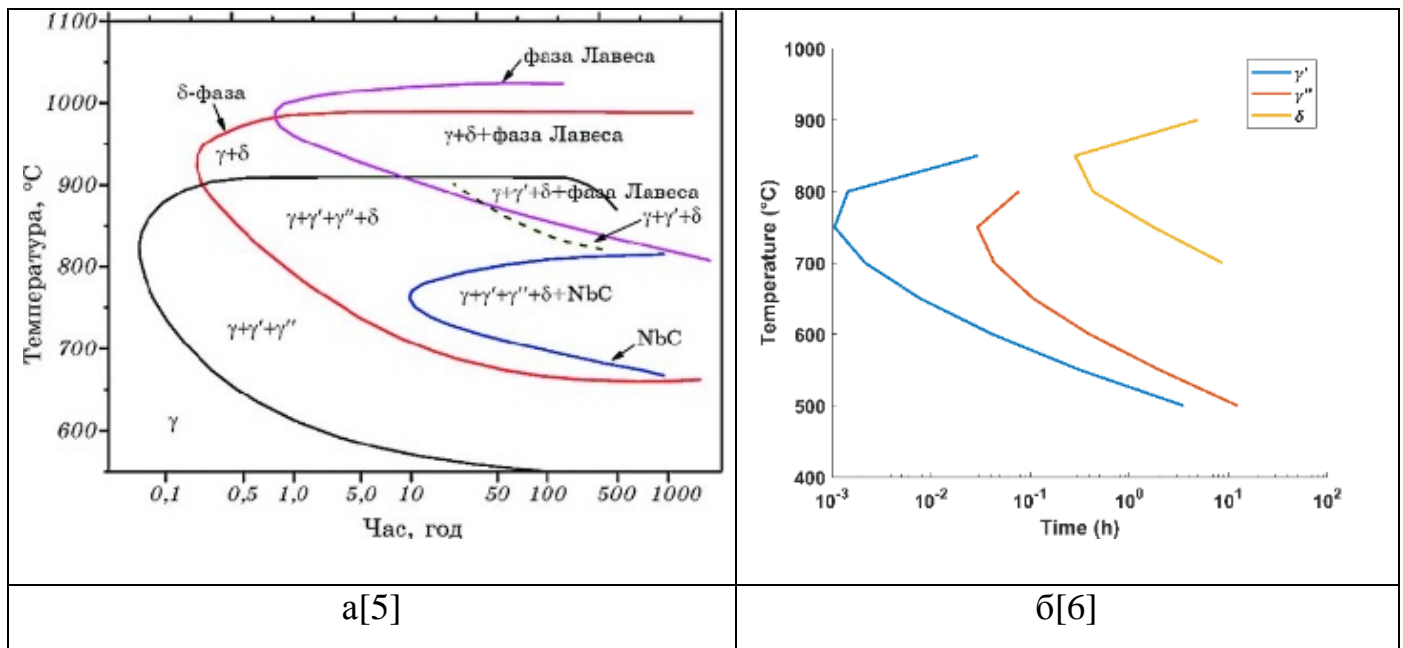


Рисунок 2.15 – Схема перетворення системи сплаву Inconel 718: а – схема перетворення та виділення фаз в сплаві Inconel 718 традиційного способу виготовлення, б – модельована відповідно до Inconel 718 за ВЛП-технологією.

Поетапне моделювання в програмному комплексі приведено на рисунку 2.16.

1. Після запуску програми обираємо Material Types, після чого зі списку обираємо NiFe Based Superalloy.
2. Встановлюємо хімічний склад та обираємо TTT/CCT Diagrams (кроки 3–4).
3. Як на фото інструкції обираємо необхідні фази та суму трансформації (крок 5).
4. Для початку розрахунку натискаємо Start calculation (крок 6).
5. Отримаємо результат моделювання (крок 7).

З розгляду методик застосування СПЗ в матеріалознавстві та термічній обробці металів та сплавів показана можливість отримання прогнозних моделей та швидкого проведення структурно-фазового аналізу, перевірки геометричних параметрів деталей та отримання числових даних з представлених в матеріалознавстві у вигляді графічної інформації. Продемонстровані методики дозволяють розвинути уявлення застосування СПЗ в процесі досліджень характеристик металопродукції.

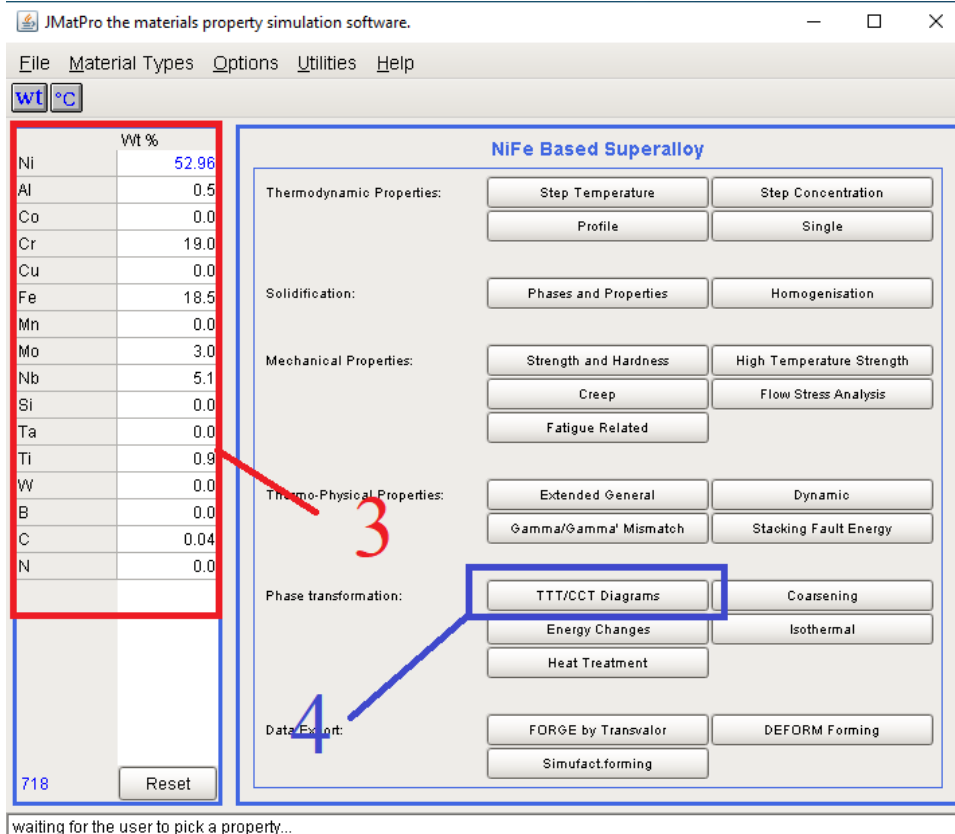
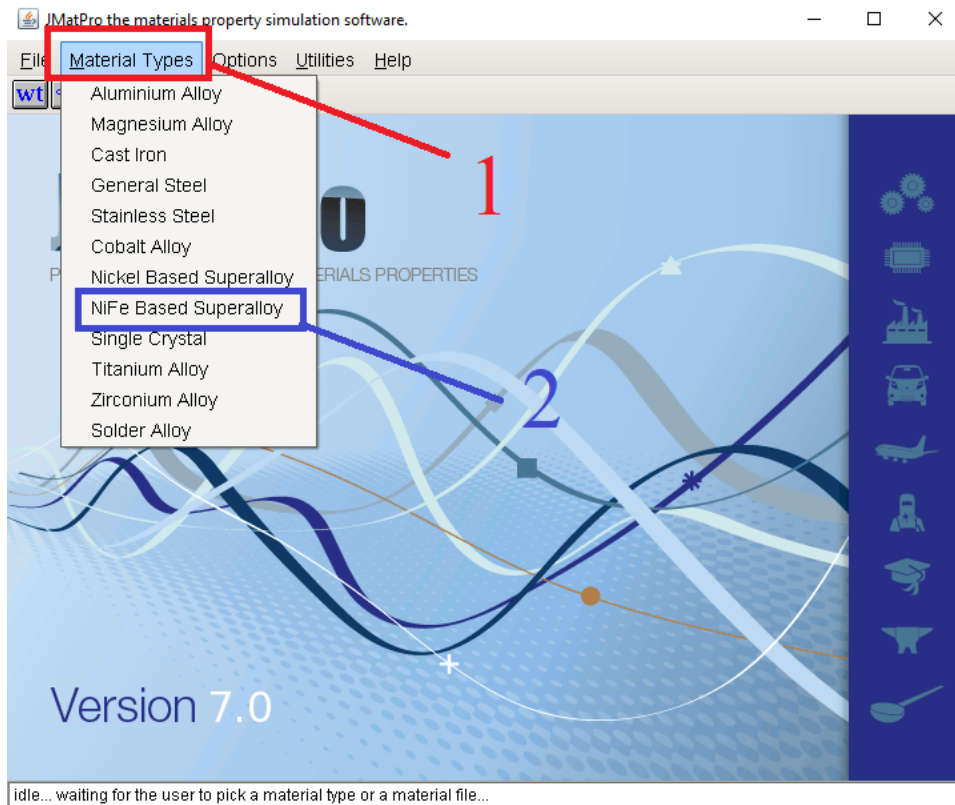
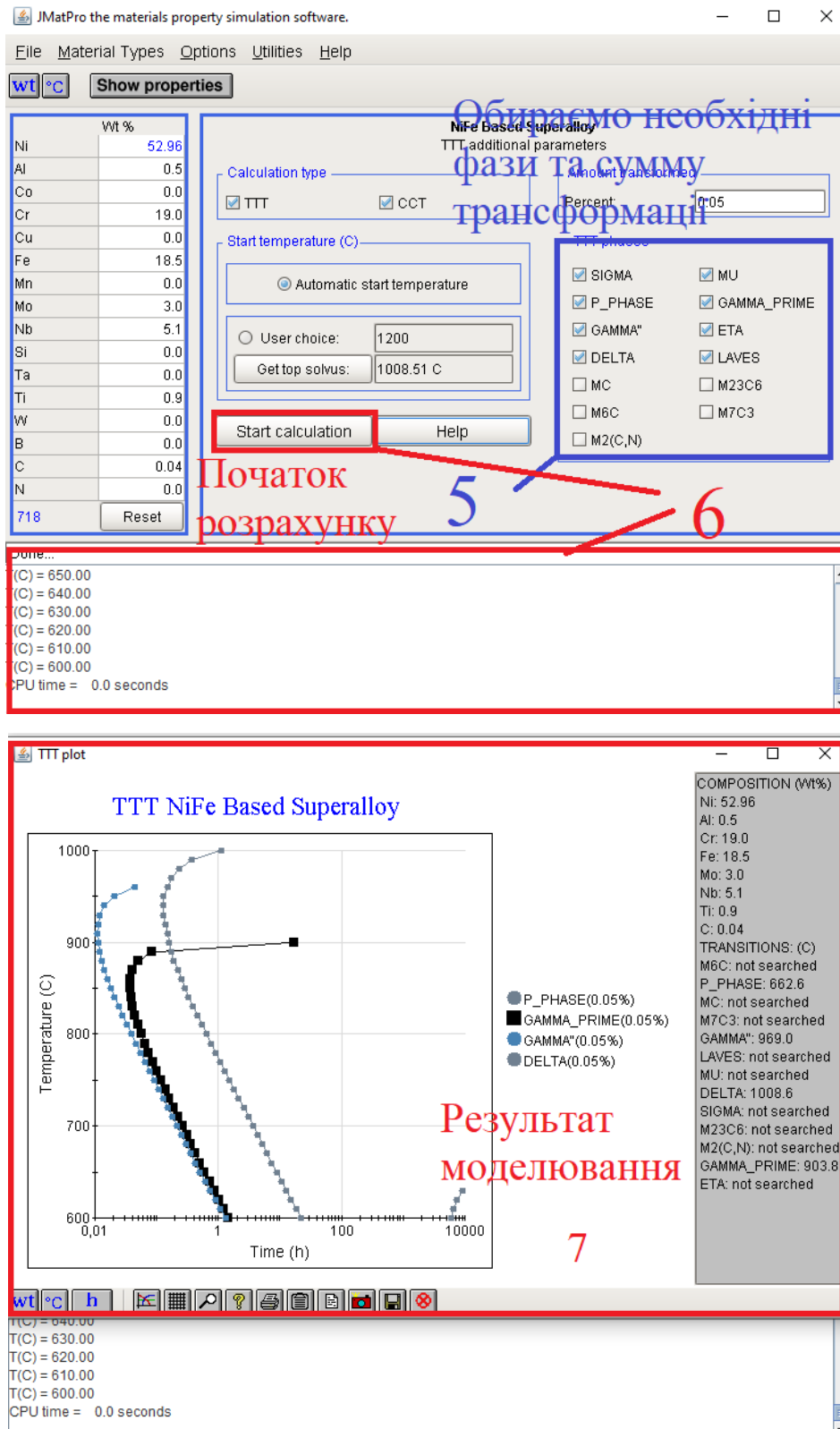


Рисунок 2.16 – Поетапне проведення математичного моделювання фазового перетворення сплаву Inconel 718 з врахуванням розміру зерна при виготовленні за ВЛП-технологією

Продовження рисунка 2.16.



3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ, СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ У ПАКЕТІ QFORM

3.1 Теоретичні відомості [7]

QForm розраховує нестационарне температурне поле в заготовці, що змінюється у часі в процесі деформації, нагрівання або охолодження заготовки. Температурне поле залежить від наступних теплових ефектів:

1. Теплообмін між частинами нагрітої заготовки через її теплопровідність;
2. Тепловий ефект пластичної деформації, що полягає у частковому перетворенні роботи деформації на теплоту;
3. Теплообмін між заготовкою та навколишнім середовищем, що здійснюється шляхом конвекції та випромінювання;
4. Теплообмін між заготовкою та інструментом, що здійснюється через мастильну плівку;
5. Тепловий ефект тертя, що полягає в частковому перетворенні на теплоту роботи тертя між заготовкою та інструментом;
6. Теплообмін між частинами інструменту, що визначається його теплопровідністю;
7. Теплообмін між інструментом та навколишнім середовищем шляхом конвекції та випромінювання;
8. Пряме нагрівання тепловим потоком частини поверхні або обсягу заготовки.

На схемі теплообміну наведено вихідні дані, необхідні для моделювання процесу теплообміну у програмі QForm.

3.1.1. Елементарні відомості з теорії теплопередачі

Згідно другому закону термодинаміки, якщо у просторі існує різниця температур між двома точками, то мимоволі відбувається перенесення енергії (теплообмін) від області з більшою температурою до області з меншою температурою. Результатом розв'язання задачі теплообміну при гарячій деформації та термічній обробці є розподіл температур у металовиробах залежно від координат та часу.

Виділяють такі три види теплообміну:

- теплопровідність;

- конвекція;
- випромінювання.

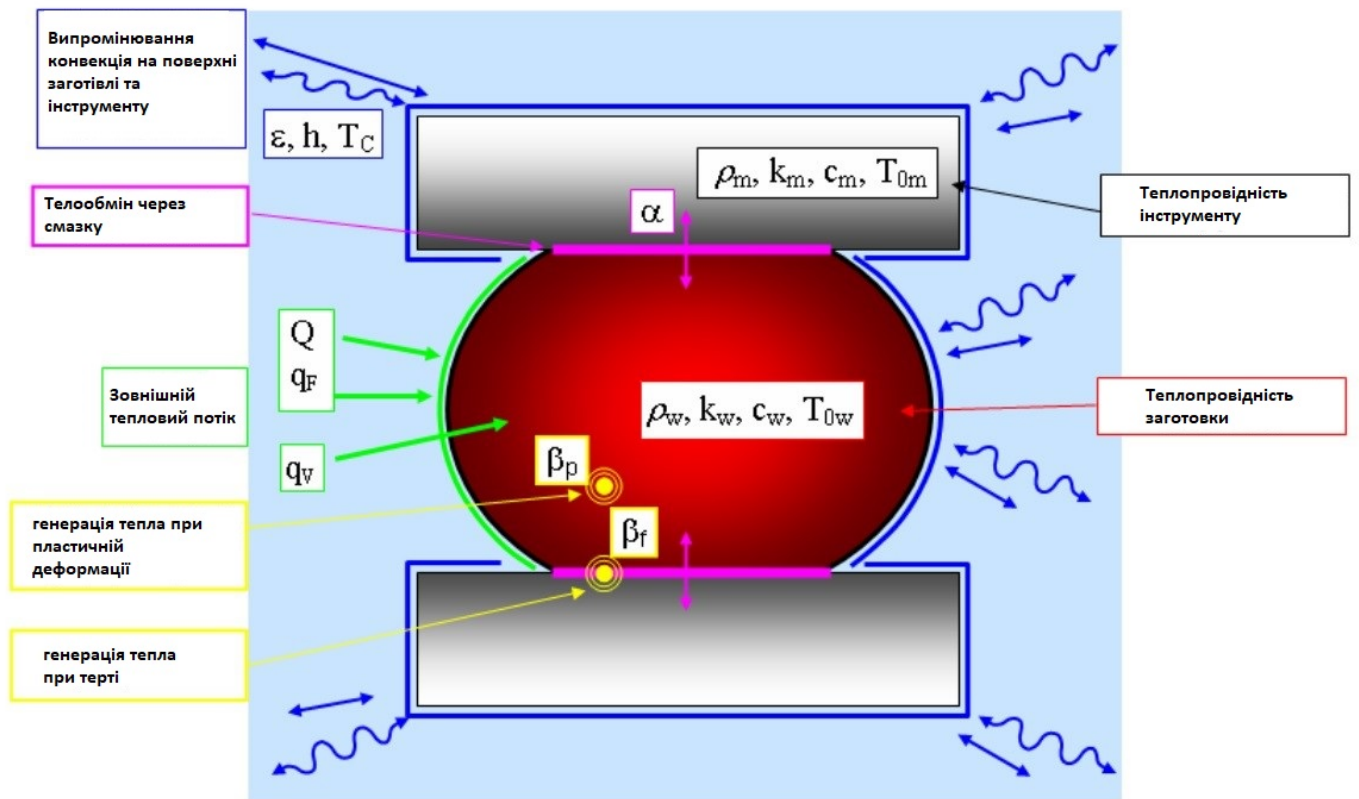


Рисунок 3.1 – Схема моделювання процесу теплообміну під час гарячої пластичної деформації

3.1.2 Теплопровідність

Передача тепла теплопровідністю здійснюється за безпосереднього контакту частин тіла з різною температурою.

Диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності, що використовується для моделювання цього явища у програмі QForm має вигляд (3.1):

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_G = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

або у скороченому вигляді (3.2):

$$k(\Delta T) + q_G = \rho c \dot{T} \quad (3.2)$$

де D – оператор Лапласа, T – температурне поле [K], t – час [с], k – коефіцієнт теплопровідності [Вт/(м K)], ρ – щільність [кг/м³], c – питома теплоємність [Дж/(кг K)], q_G – потужність внутрішнього джерела тепла [Вт/м³].

У програмі QForm потужність внутрішнього джерела тепла є сума питомої потужності зовнішнього теплового потоку q_V (може бути заданий у вихідних даних та використаний для моделювання різних методів нагрівання заготівлі) та щільності теплового потоку, обумовленої генерацією тепла в процесі пластичної деформації q_p (3.3).

$$q_p = \beta_p \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} \quad (3.3)$$

де β_p – коефіцієнт перетворення роботи деформації на тепло (0.9 ... 0.95);

$\bar{\sigma}$ – інтенсивність напружень (ефективне напруження);

$\dot{\varepsilon}$ – інтенсивність швидкостей деформацій (ефективна швидкість деформацій).

Для вирішення диференціального рівняння теплопровідності необхідно встановити початкові умови T_0 і граничні умови. Виділяють граничні умови 1-го роду (розподіл температури на поверхні тіла для кожного моменту часу – QForm не використовуються); 2-го роду (значення теплового потоку для кожної точки поверхні тіла та будь-якого моменту часу – у QForm використовується або тепловий потік на всю поверхню, або питомий тепловий потік на одиницю поверхні); 3-го роду (задаються температура навколишнього середовища та закон теплообміну між поверхнею тіла та навколишнім середовищем).

Для визначення граничних умов 3-го роду використовується закон Фур'є (кількість теплоти, що проходить в одиницю часу через одиницю площі ізотермічної поверхні пропорційно градієнту температури) (3.4):

$$q_n = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.4)$$

де n – нормаль до поверхні теплообміну, q_n – щільність теплового потоку через поверхню теплообміну, що визначається сумою конвективного

теплообміну та теплообміну випромінюванням на поверхні заготовівлі та інструменту [Вт/м²].

При виведенні співвідношень методу кінцевих елементів використовується варіаційне формулювання рівняння теплопровідності у вигляді (3.5):

$$\int_V kT_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_V q_p \delta T dV - \int_S q_n \delta T dS = 0 \quad (3.5)$$

Тут використано скорочений запис (3.6):

$$T_{,i} = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.6)$$

Варіаційне формулювання еквівалентне диференційному рівнянню теплопровідності з урахуванням граничних умов третього роду на поверхні тіла.

3.1.3 Конвекція

Конвективний теплообмін відбувається у разі контакту поверхні твердого тіла з газом (або рідиною), що має іншу температуру. У програмі QForm для опису конвективного теплообміну використовується закон Ньютона-Ріхмана (3.7)

$$q_n = h(T_1 - T_C) \quad (3.7),$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі [Вт/(м²*°K)], T_1 – температура тіла (заготовки або інструменту), T_C – температура навколишнього середовища. Температура навколишнього середовища у програмі QForm вважається постійною та задається у вихідних даних.

При моделюванні контакту заготовки з інструментом через мастило температура мастила не враховується, а закон Ньютона-Ріхмана використовується у такому вигляді (3.8):

$$q_n = b\alpha(T_1 - T_2) \quad (3.8),$$

де α - коефіцієнт теплопередачі [Вт/(м² °К)], комплексно враховує коефіцієнти тепловіддачі між заготовкою і мастилом і між мастилом та інструментом; T_1 – температура заготовки; T_2 – температура інструменту; b - коефіцієнт паузи, що показує у скільки разів необхідно зменшити коефіцієнт теплопередачі за відсутності щільного контакту між заготовкою й інструментом. Коефіцієнт паузи береться до уваги при моделюванні теплової задачі (нагрів та охолодження заготовки та інструменту без примусового переміщення штампів технологічним обладнанням для пластичної деформації заготовки).

3.1.4 Випромінювання

Теплообмін випромінюванням відбувається без безпосереднього контакту між тілами. І тут перенесення тепла здійснюється як електромагнітна хвиля. Щільність теплового потоку випромінювання на поверхні визначається за формулою (3.9):

$$q_n = \varepsilon \sigma_0 (T_1^4 - T_C^4) \quad (3.9)$$

де ε – ступінь чорноти реального тіла, яка визначається як відношення випромінювальної здатності даного тіла до випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла за тієї ж температури, $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постійна Стефана-Больцмана.

3.1.5 Дискретизація середовища для аналізу теплообміну

Процес теплообміну QForm моделюється за допомогою методу кінцевих елементів. Відповідно до цього методу просторова дискретизація завдання здійснюється шляхом розбиття розрахункової області на невеликі дотичні обсяги. У середині кожного контрольного обсягу знаходиться одна точка «прив'язки» шуканого сіткового рішення. Як кінцеві обсяги в QForm використані осередки Вороного.

Діаграма Вороного (осередки Вороного) – це особливий вид розбиття метричного простору, що визначається відстанями до заданої дискретної множини ізольованих точок цього простору. Вона названа на честь

українського математика Георгія Вороного. Інші назви – теселяція Вороного, декомпозиція Вороного, чи теселяція Діріхле (на честь Лежена Діріхле).

Сітка осередків Вороного будується на базі кінцево-елементної сітки (рис. 3.2), яка використовується для дискретизації деформаційного завдання. У кожному з кінцевих елементів виділяється точка, рівновіддалена від кутових вузлів трикутного (2D завдання) або тетраедрального (3D) елемента. Таким чином, кінцеві обсяги у вигляді осередків Вороного є геометричними фігурами, ребра яких з'єднують центри описаних кіл для трикутних (2D) і описаних сфер для тетраедральних (3D) кінцевих елементів.

Слід зазначити, що в більшості випадків програмний комплекс QForm розроблявся для процесів обробки металів тиском. Виходячи з аналізу можливостей встановлено, що даний комплекс підходить для використання матеріалознавцями та спеціалістами з термічної обробки металів та сплавів.

Моделювання з використанням процесів фазового перетворення є важливим та завжди актуальним завданням для матеріалознавців, оскільки вони надають повну інформацію, необхідну для призначення раціональних режимів термічної обробки сталей.

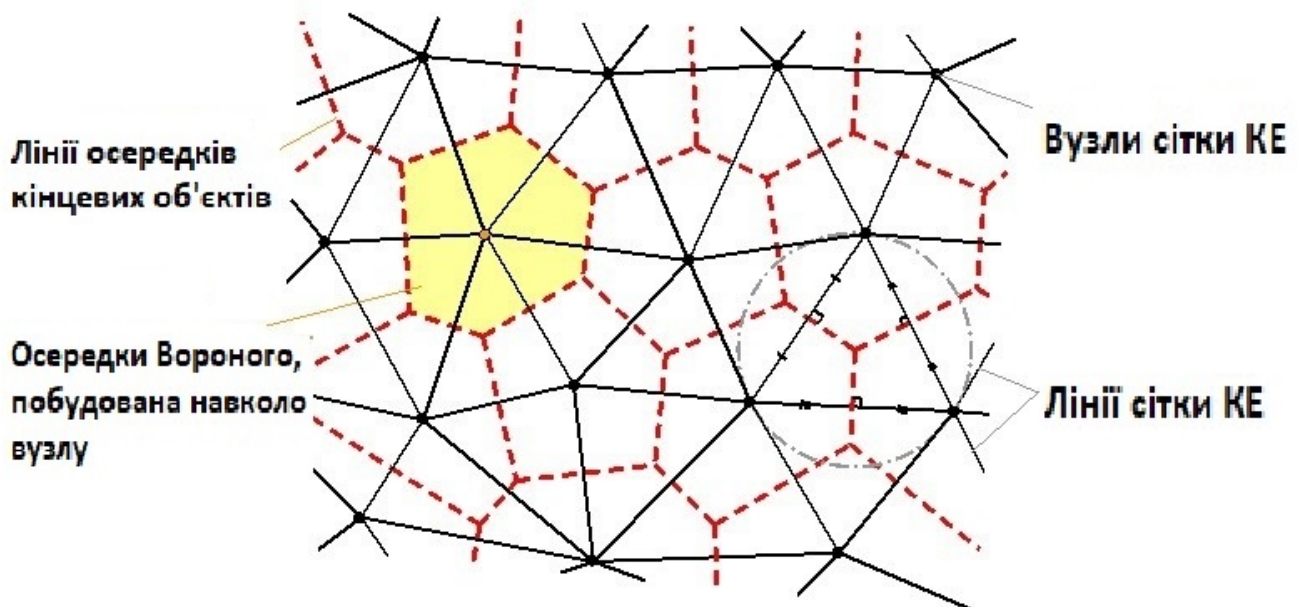


Рисунок 3.2 – Побудова осередків Вороного на базі сітки кінцевих елементів для 2D завдання

3.2 Практичне застосування QForm в задачах матеріалознавства та термічної обробки

Розглянемо на прикладі випробування торцевого загартування за методом Джоміні. Практичне виконання в програмі представлено на рисунку 3.3.

1. Після запуску програми обираємо «Створити новий процес».
2. У вікні Операція обираємо необхідні параметри (крок 2), такі, як назва процесу (jomini), назва операції (ТО), тип операції (Охолодження/нагрів), додаткові параметри (термо-пружнопластична задача), тип завдання (3D) і натискаємо «Вперед».
3. З'явиться вікно Нова операція, де натискаємо Завантажити із файла (крок 4). Обираємо файл з геометричною моделлю зразка Джомені та натискаємо «ОК» (крок 5).
4. У вікні Геометрія обираємо Об'єкт 1 (крок 6) та натискаємо Перетворити (крок 7).
5. З'явиться вікно, де обираємо Заготовка 1 (крок 8) і натискаємо Вперед (крок 9).
6. Як на фото інструкції натискаємо у вікні Параметри заготовки →Матеріал. [Обрати].
7. З'явиться вікно Деформовані матеріали і натискаємо Heat Treatment QForm.
8. Як на фото-інструкції вибираємо матеріал зі списку бази даних QForm, або натискаємо Створити, якщо його немає у базі даних. У базу QForm користувач може внести необхідні йому дані щодо матеріалу або шляхом оцифрування ТТТ або ССТ діаграм фазових перетворень, взятих з довідкової літератури (як це дивися розділи 2.1.1, 2.4), або шляхом моделювання ССТ-діаграм у відповідність до розділу 2.5. посібники (крок 12). Далі ці дані вносяться до бази даних QForm (див. пункти нижче п. 9 – п. 14)
9. Як на фото-інструкції всі фазові переходи, які можливі для даного матеріалу (крок 13), попередньо наголосивши, що новий матеріал є гетерофазним, встановивши перемикач на позицію «Суміш».
10. Як на фото-інструкції натискаємо «Показати ССТ-діаграму» (крок 14).
11. З'явиться вікно ССТ, де обираємо «Побудувати ССТ криві», відповідно до п. 2.5, згідно розглянутому матеріалу.

12. Далі у вікні «Деформовані матеріали» обираємо «Назначити» (крок 16).
13. У вікні параметри заготовки ставимо галочку навпроти Мікроструктура (крок 17).
14. Вказуємо середній розмір зерен відповідно 2.1.3 цього посібника (крок 18).
15. У вікні Параметри заготовки встановлюємо «✓» навпроти «Термообробка» (крок 19), а також обираємо «QForm» (крок 19).
16. У вікні «Параметри заготовки» встановлюємо потрібну температуру і натискаєте «Вперед» (крок 21).
17. У вікні «Умови зупинки» натискаємо на «Час» і встановлюємо час охолодження (кроки 22–23). Натискаємо «Вперед».
18. У вікні «Граничні умови» обираємо «навколишнє середовище».
19. З'явиться вікно «Навколишнє середовище», де обираємо із наданих стандартних необхідне середовище (крок 27). Натискаємо «Назначити» та закриваємо вікно (крок 28). Далі натискаємо «ОК» (крок 29).
20. Як на фото-інструкції натискаємо «Запустити розрахунок» та очікуємо завершення (крок 30).
21. Далі отримуємо та аналізуємо результати (крок 31).

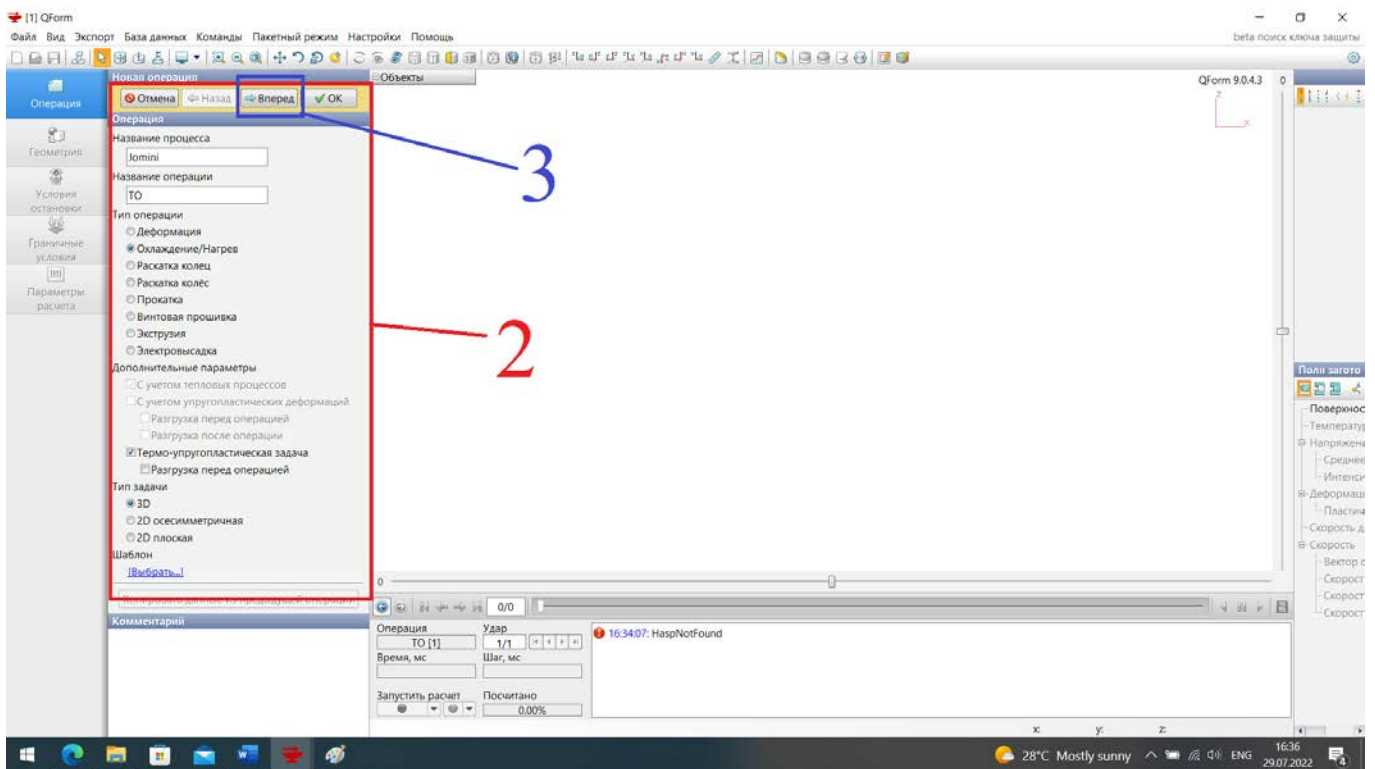
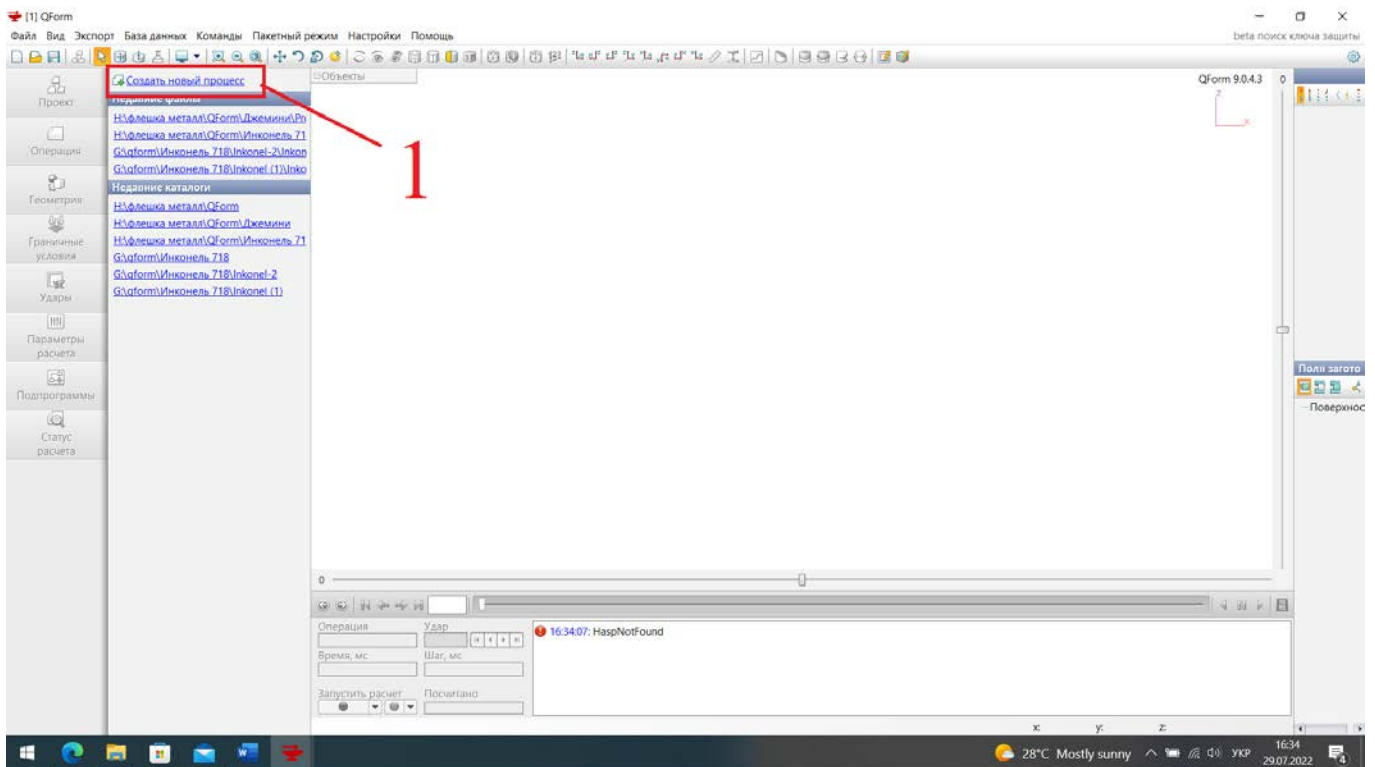
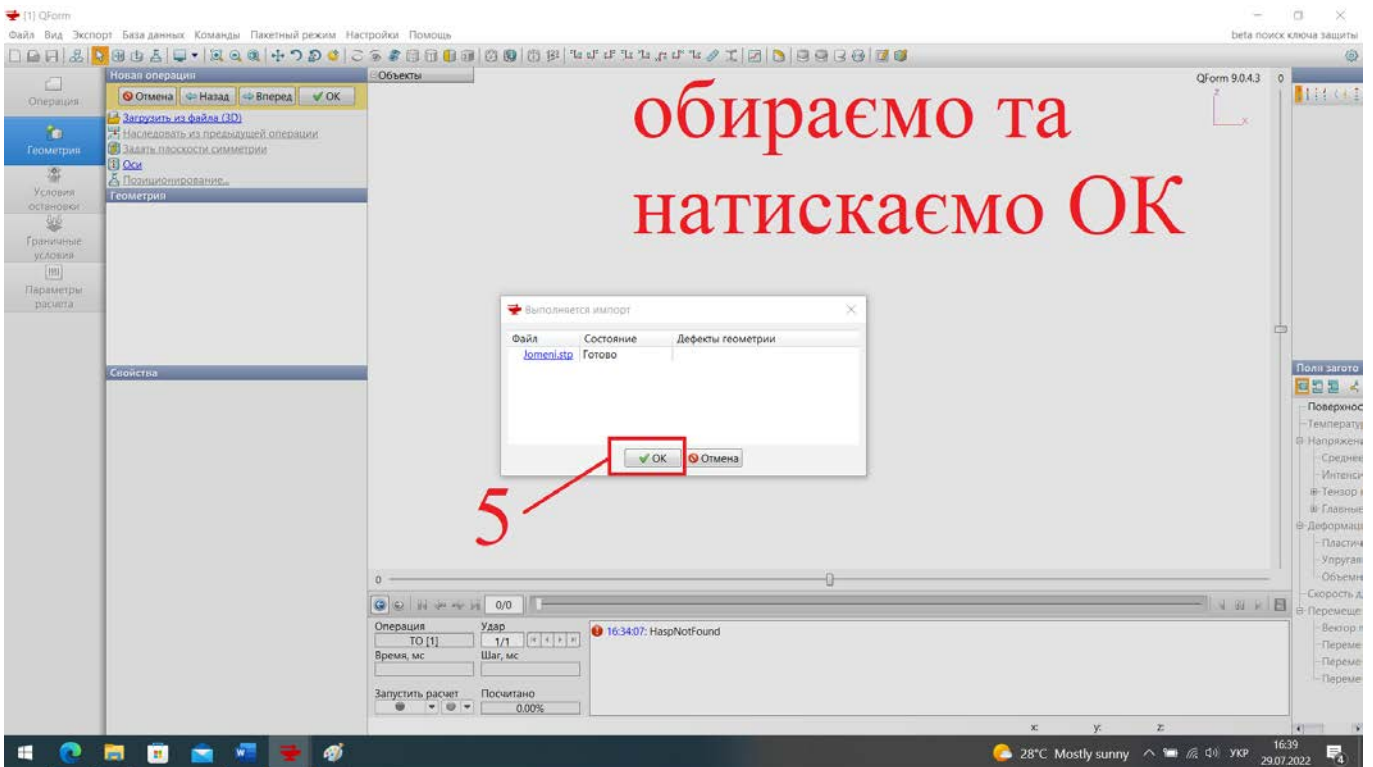
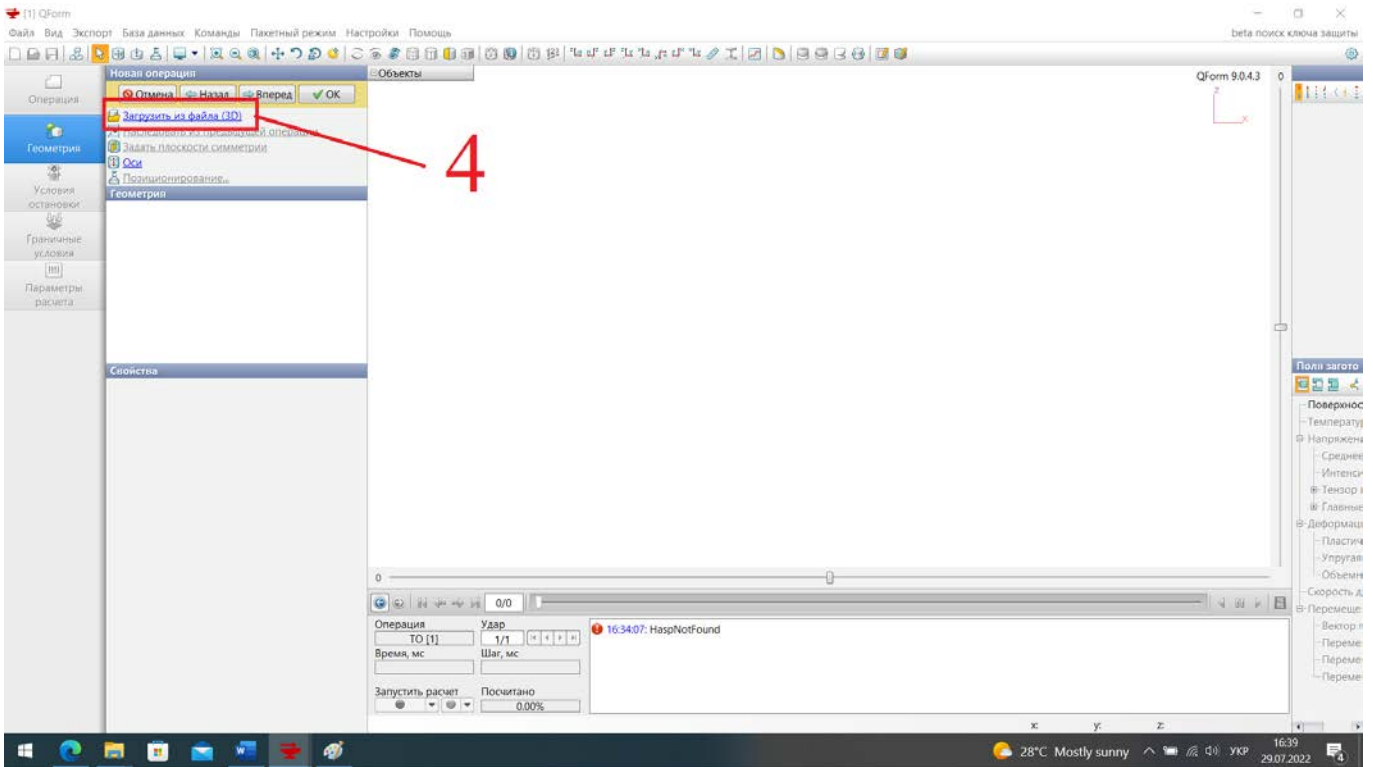
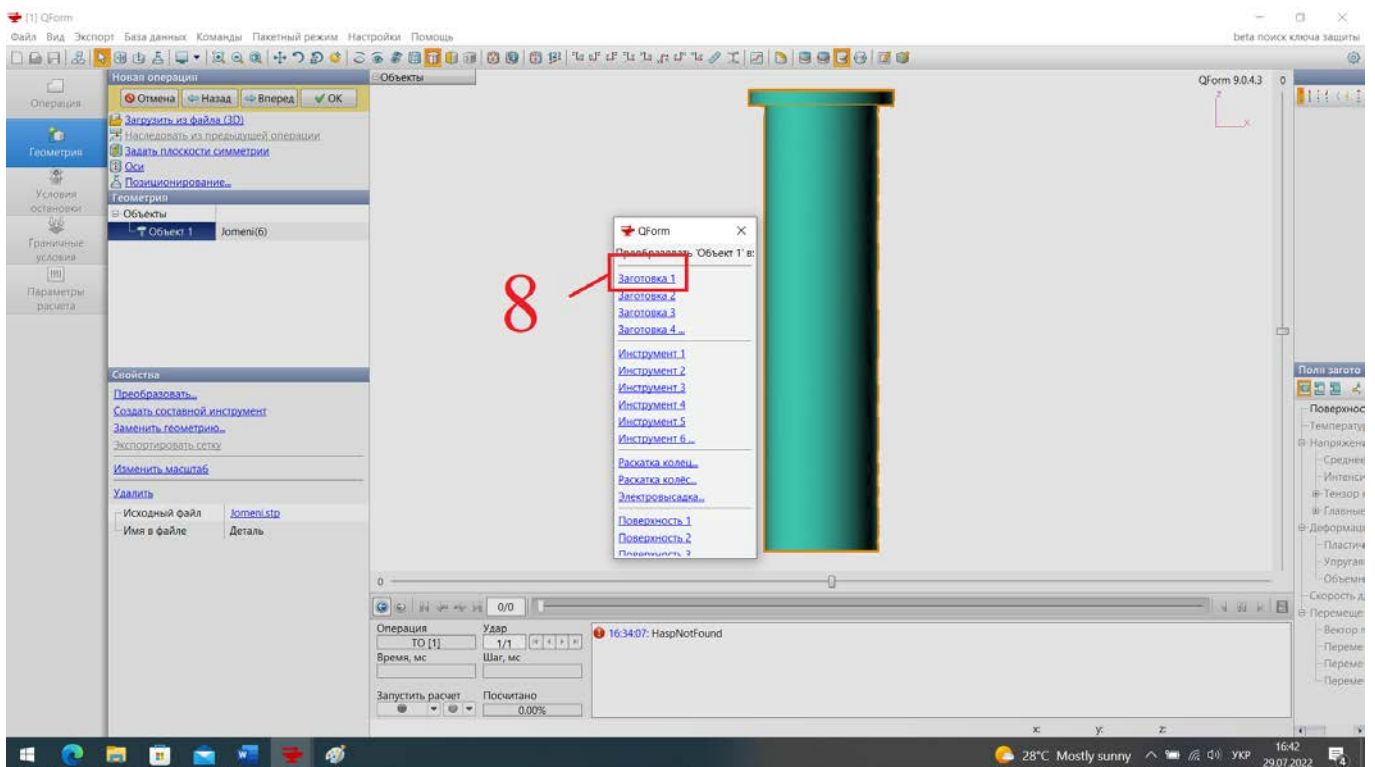
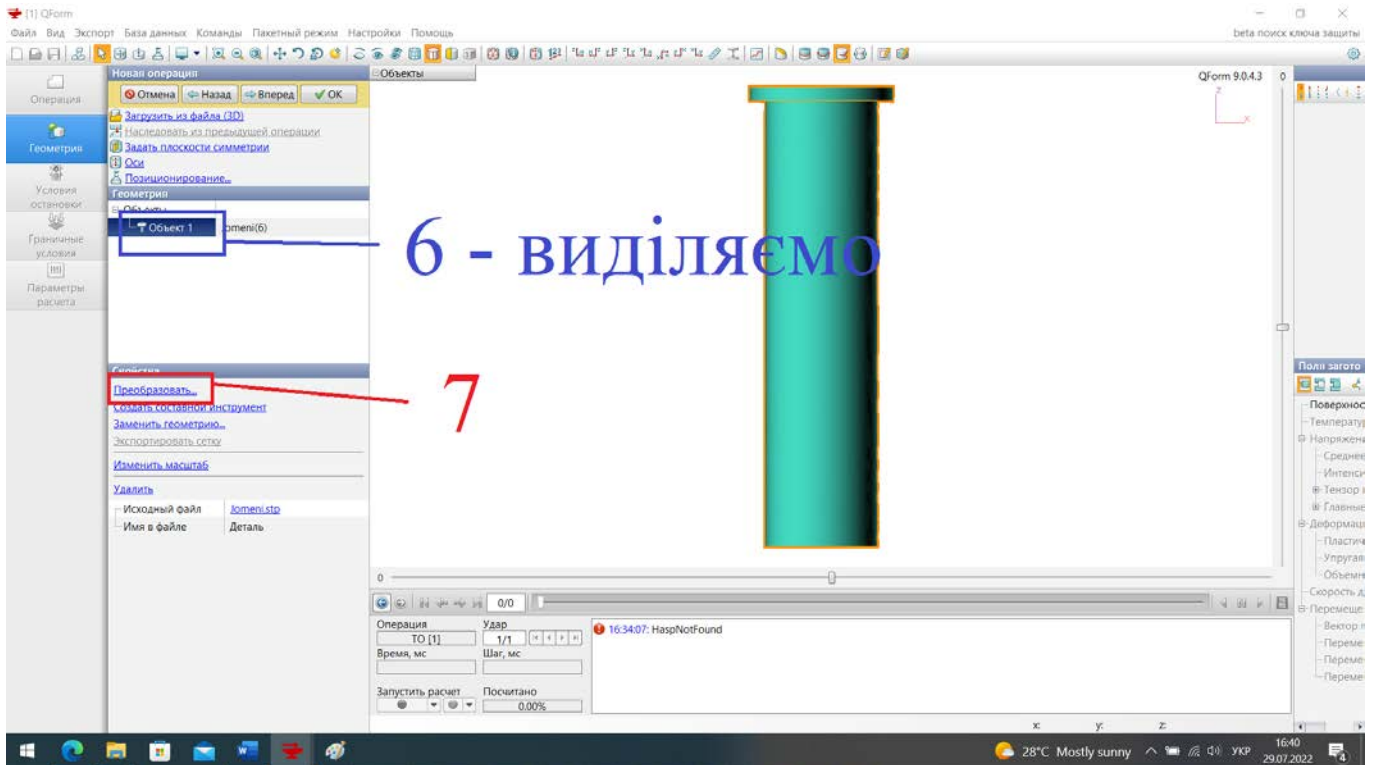


Рисунок 3.3 – Поэтапне проведення математичного моделювання експерименту Джоміні в програмному комплексі QForm.

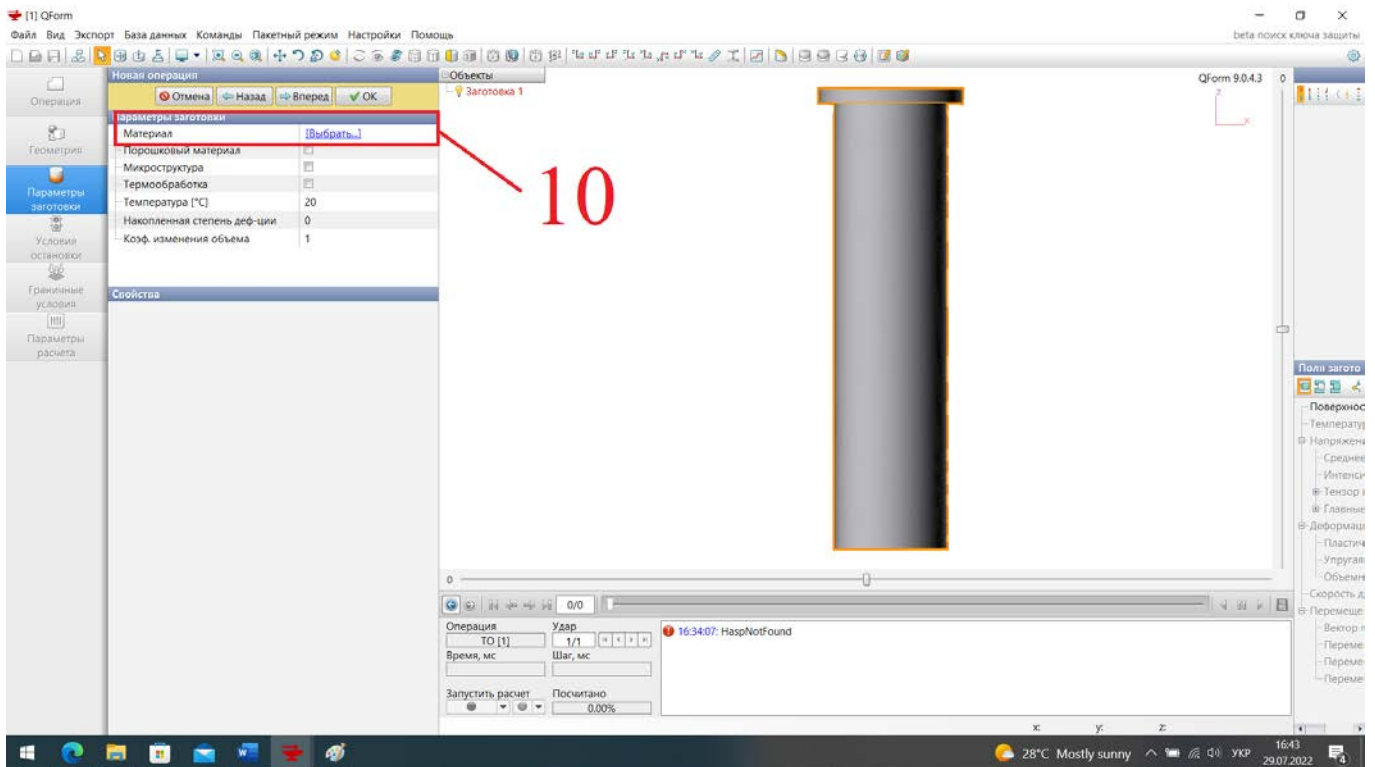
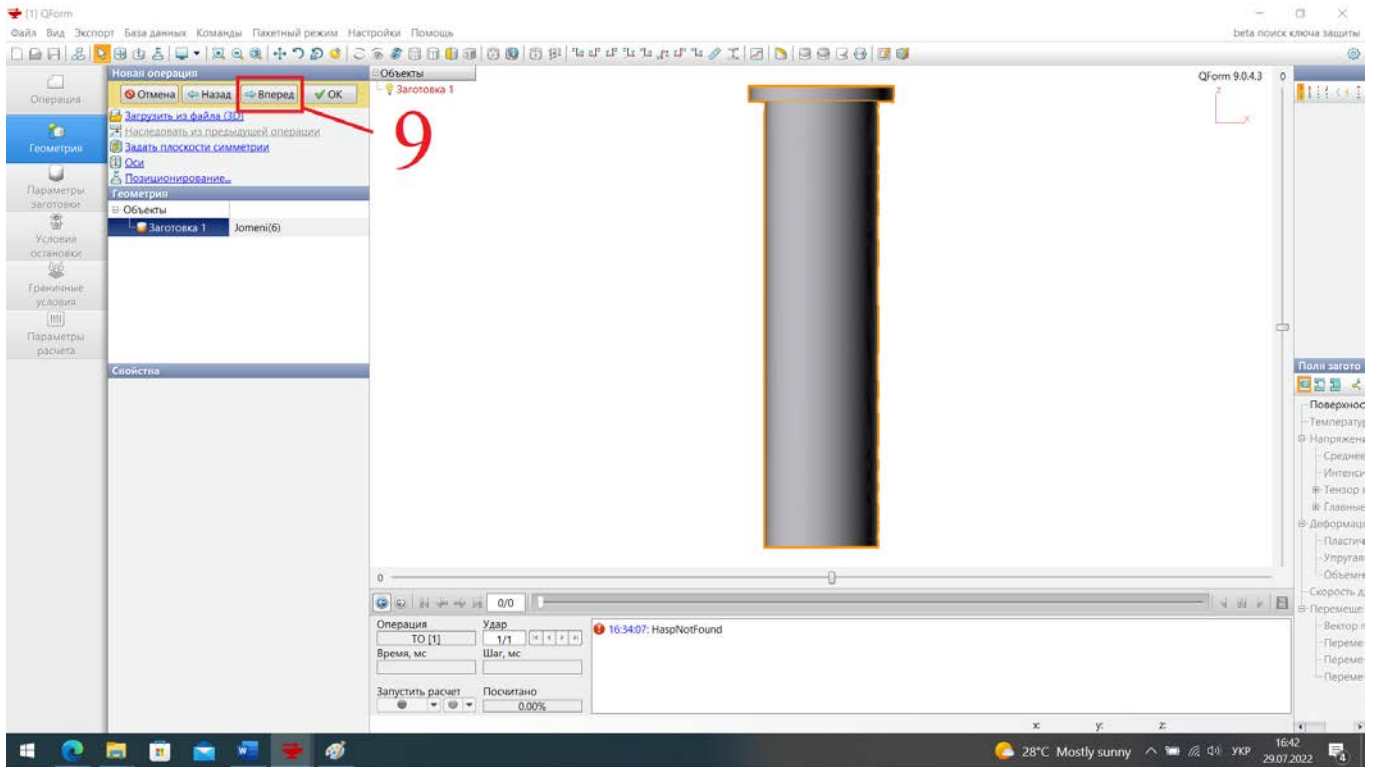
Продовження рисунка 3.3



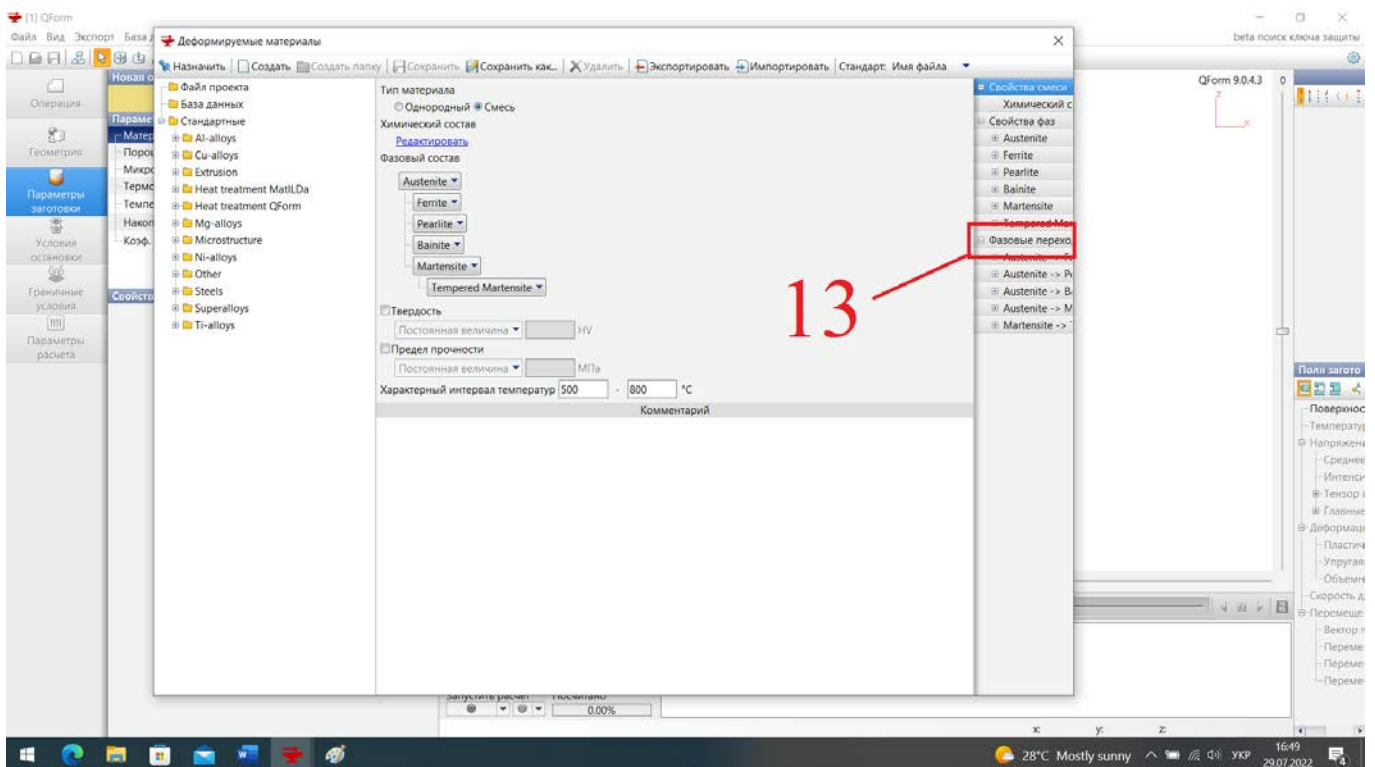
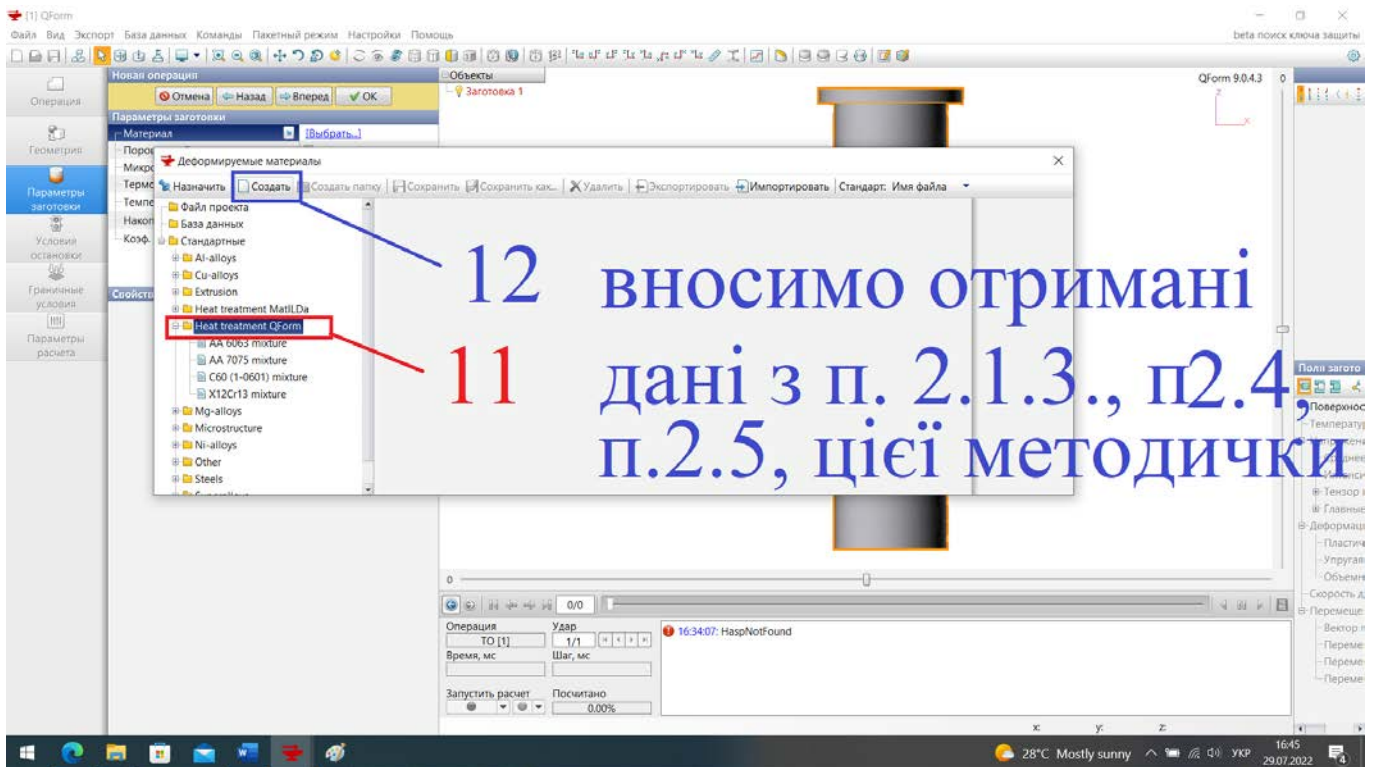
Продовження рисунка 3.3



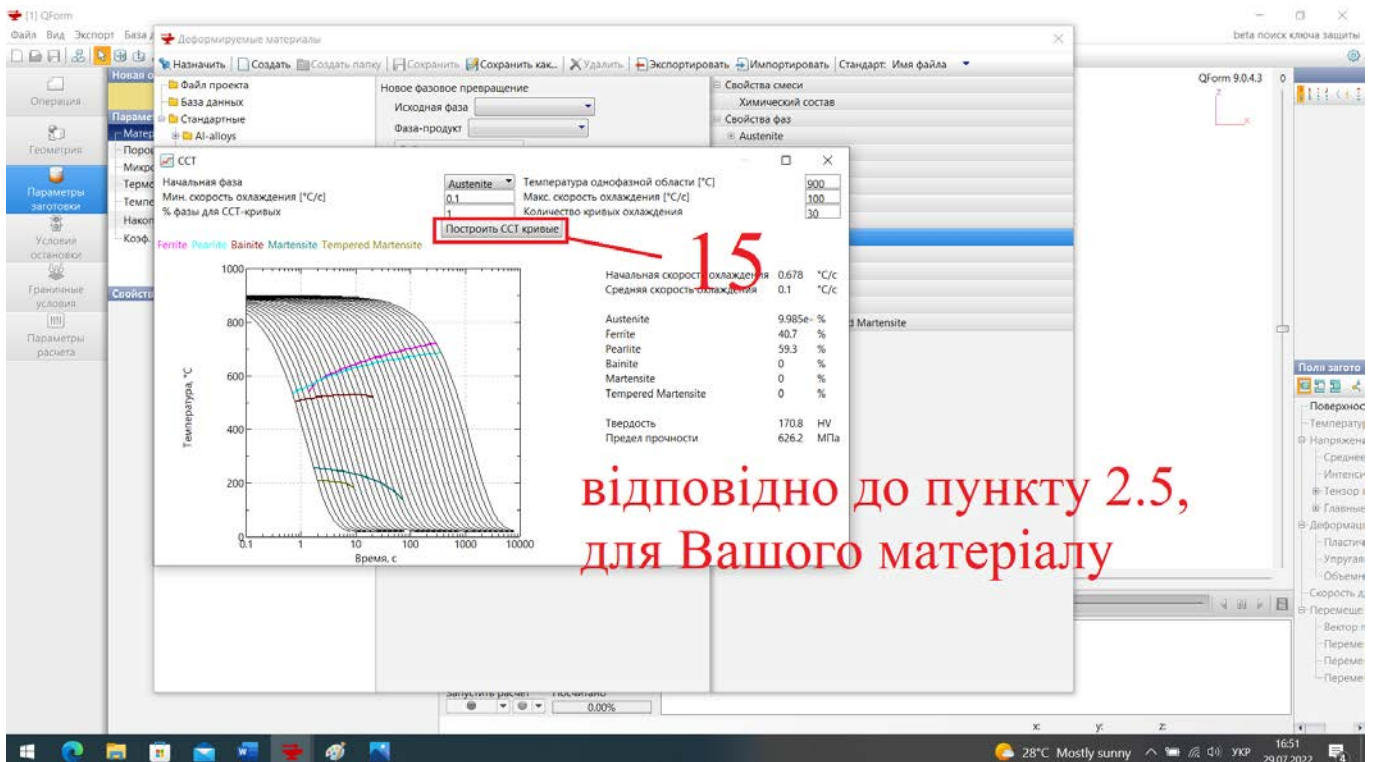
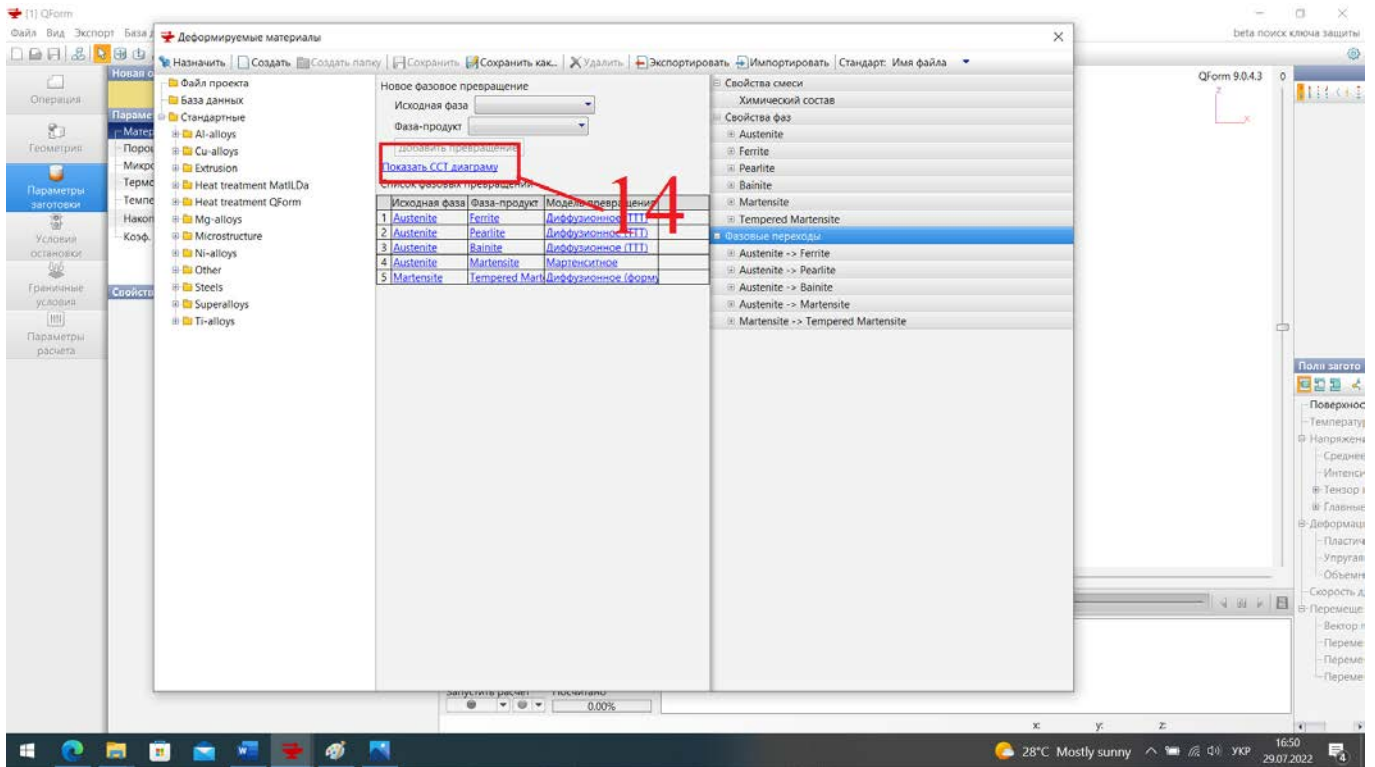
Продовження рисунка 3.3



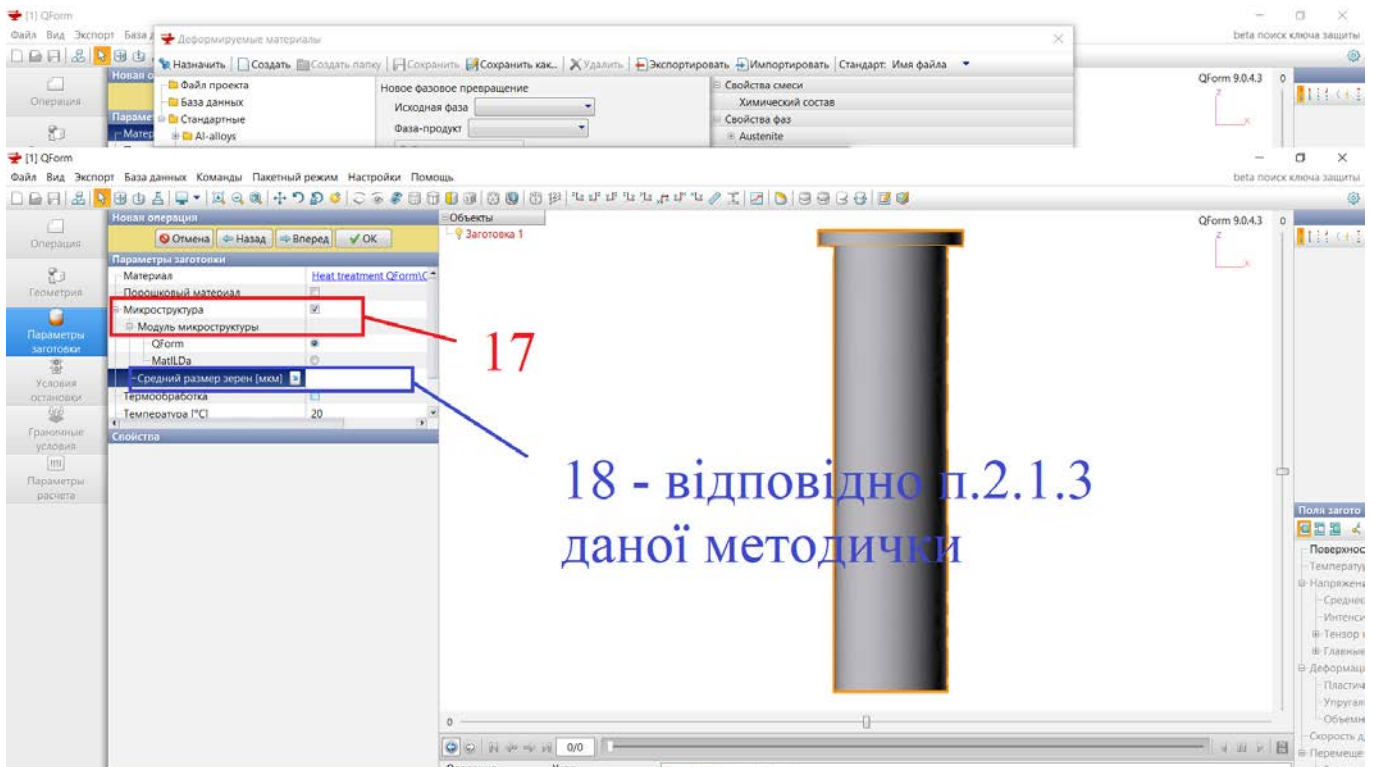
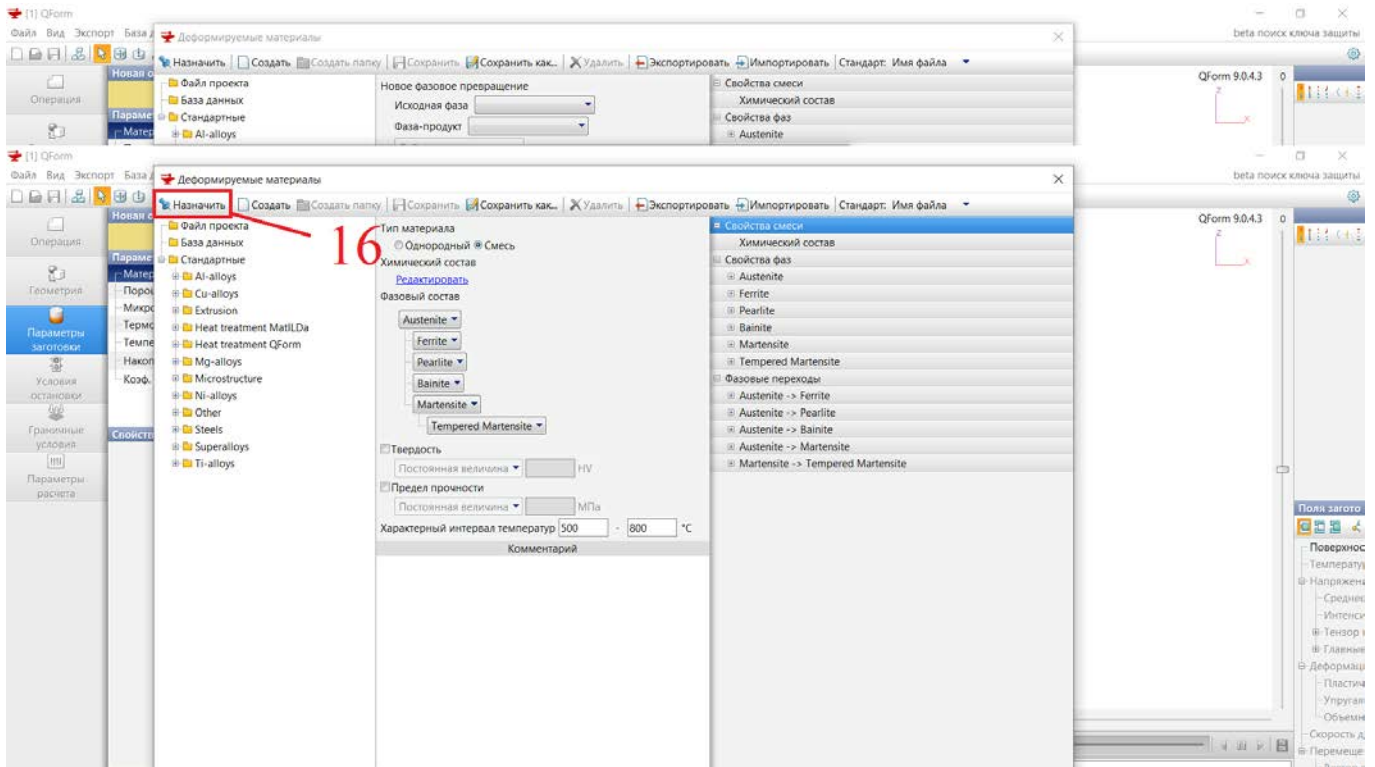
Продовження рисунка 3.3



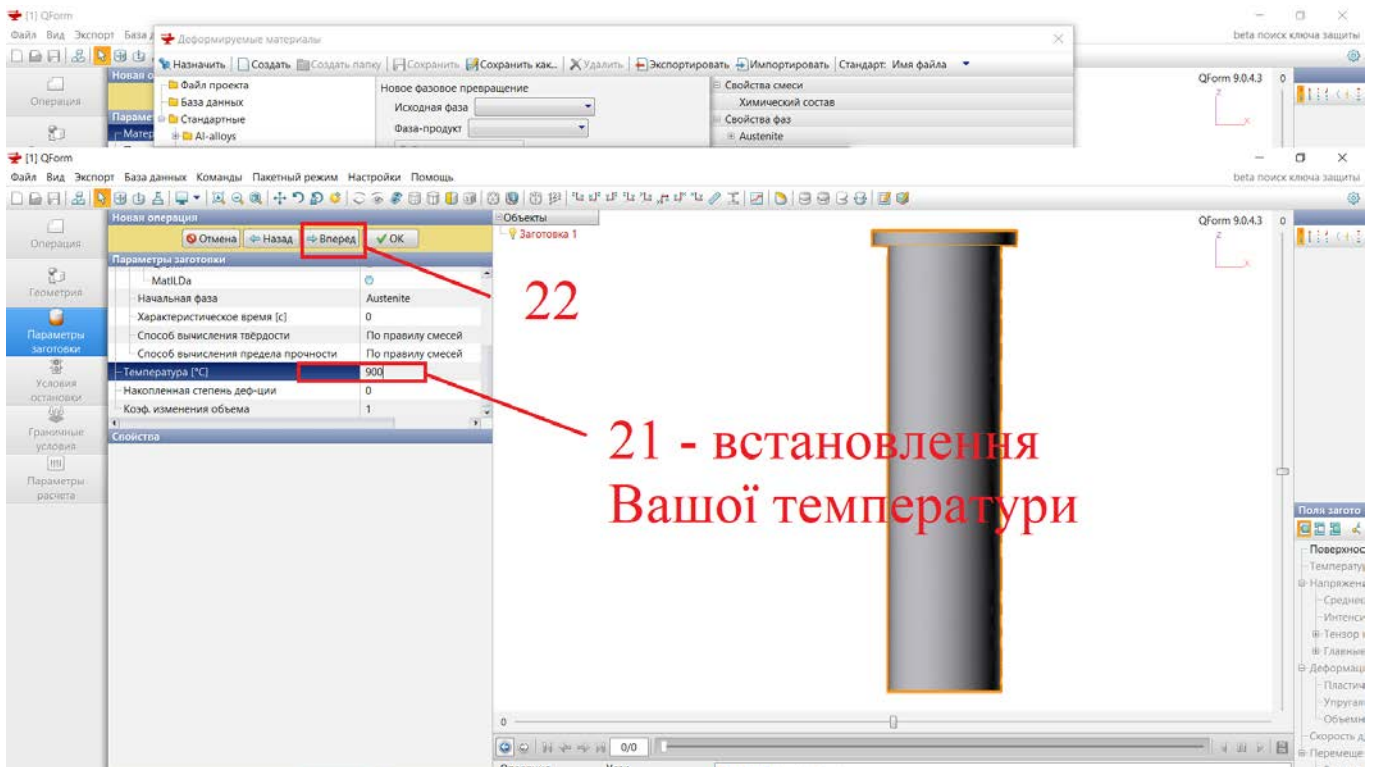
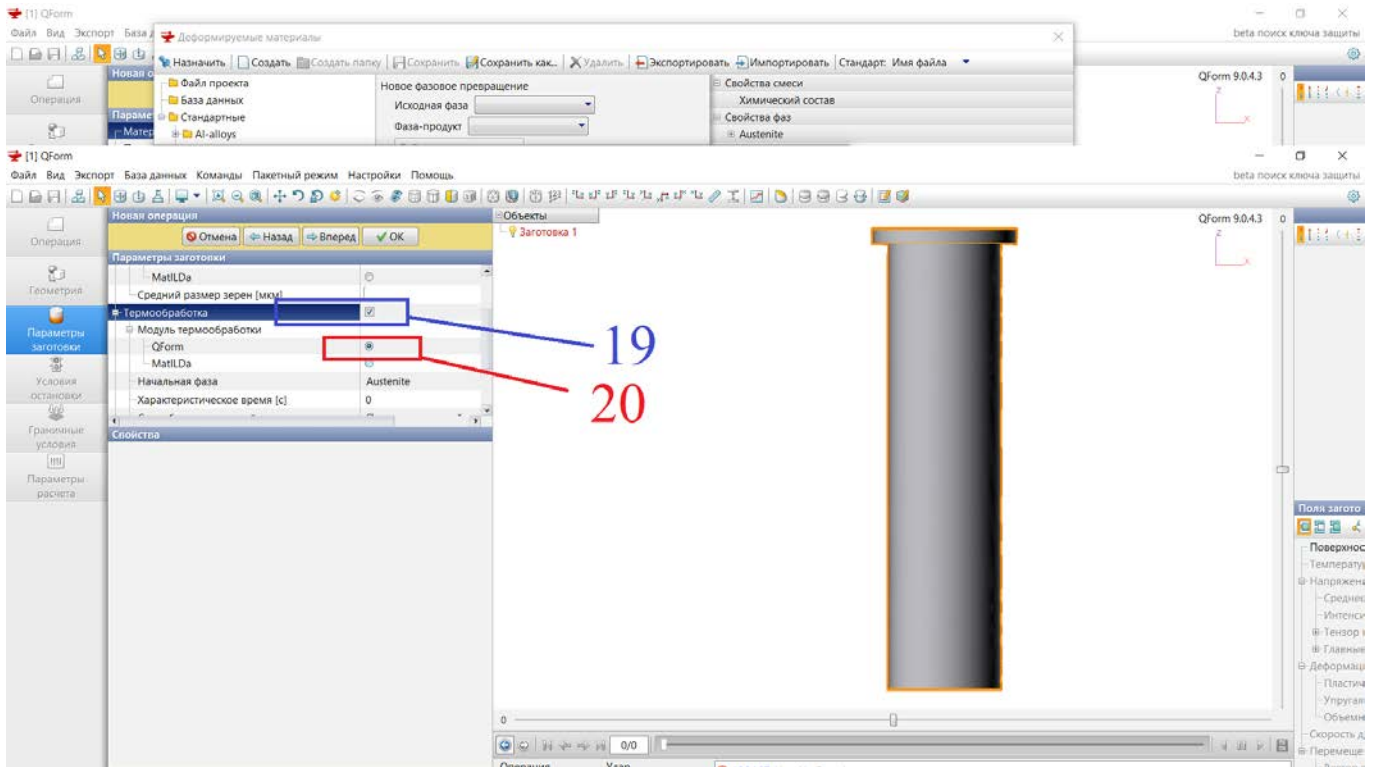
Продовження рисунка 3.3



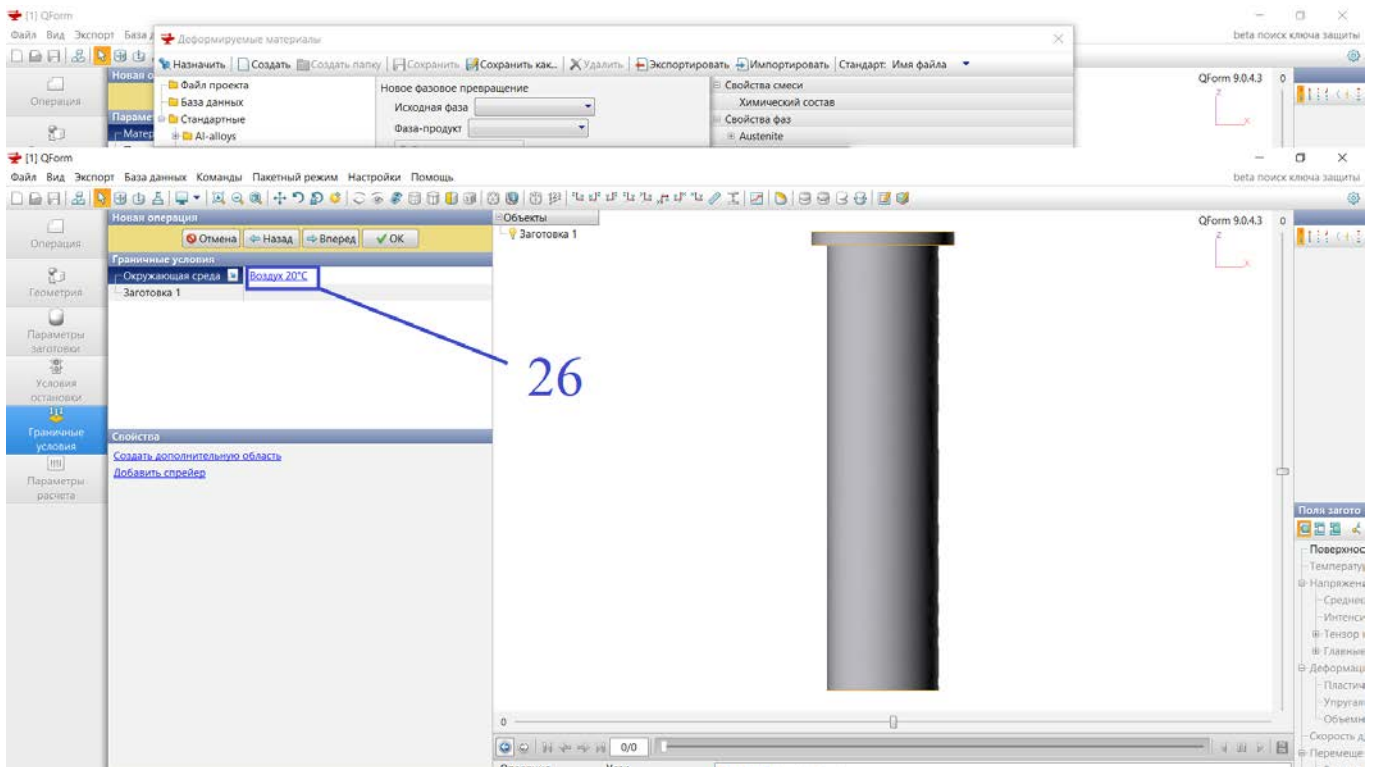
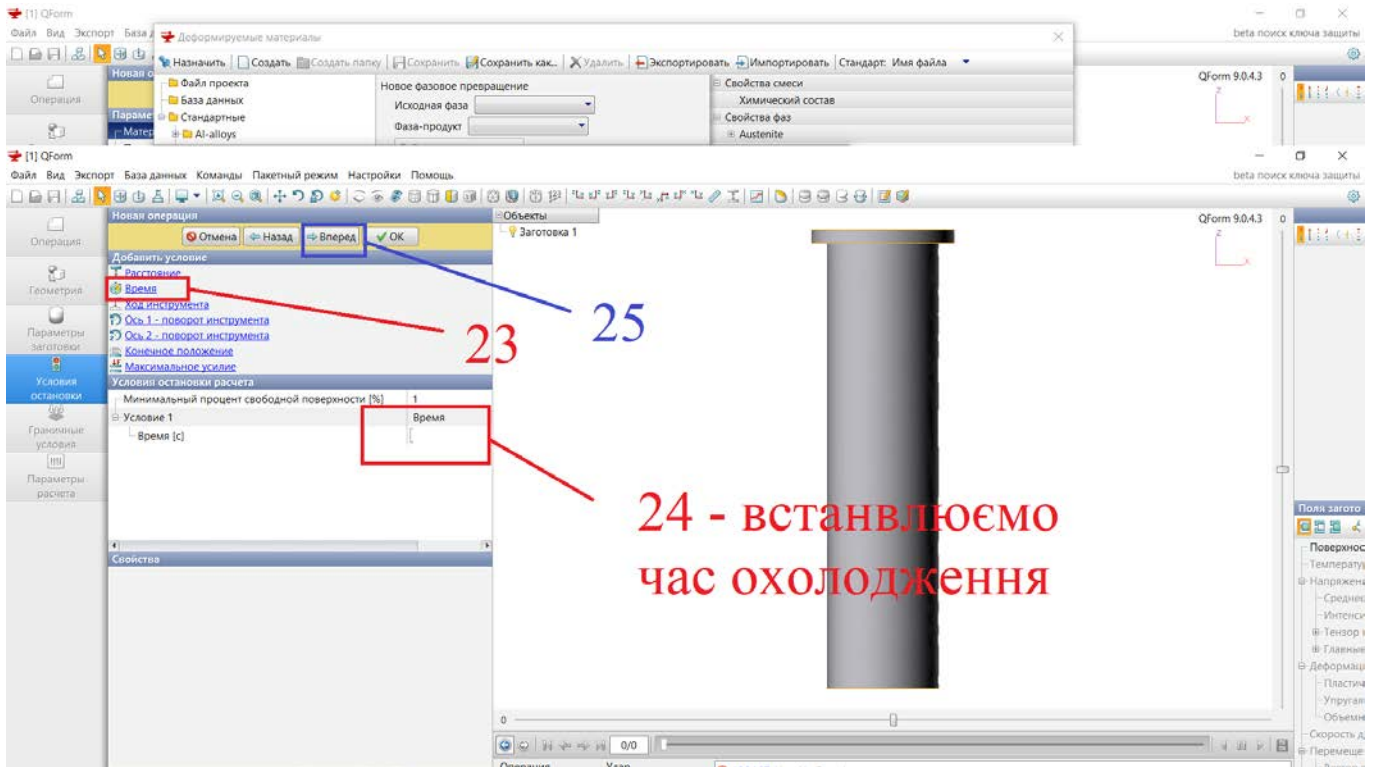
Продовження рисунка 3.3



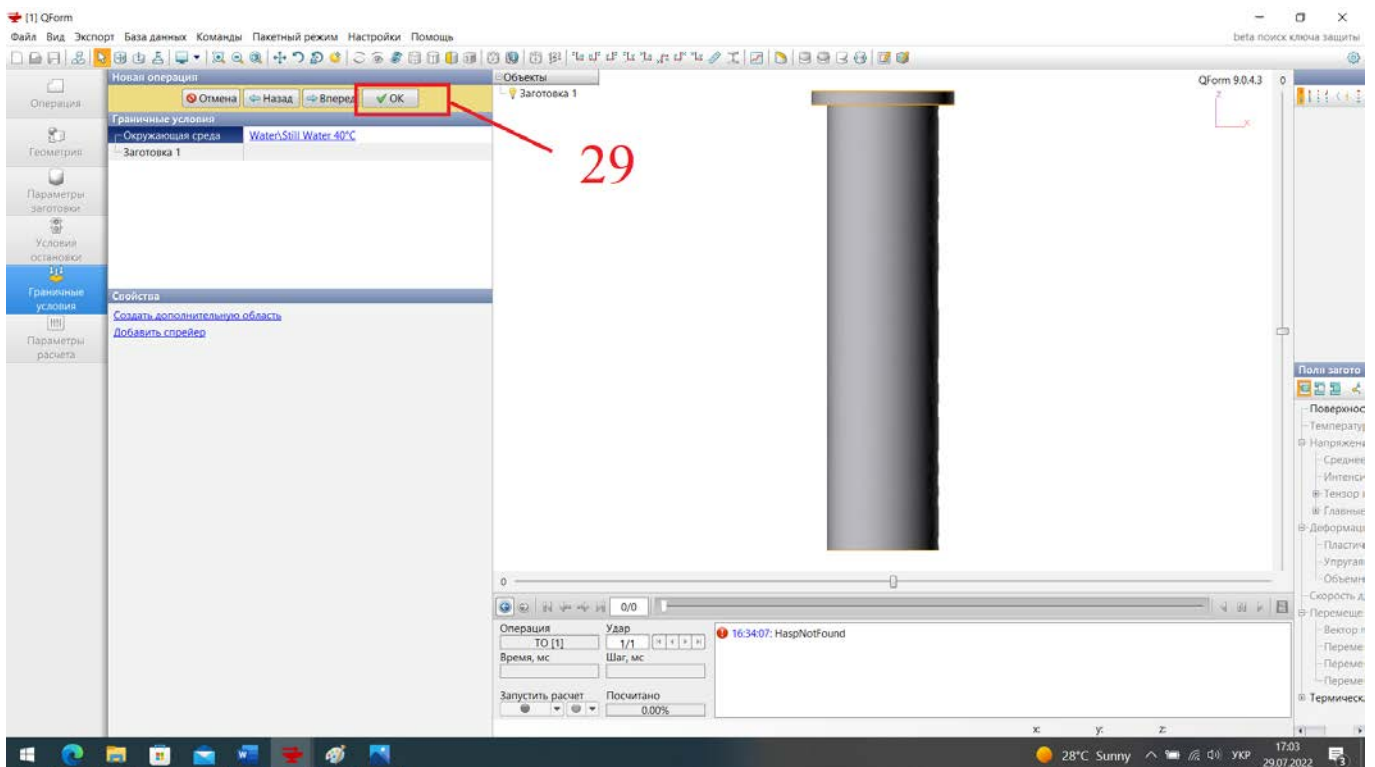
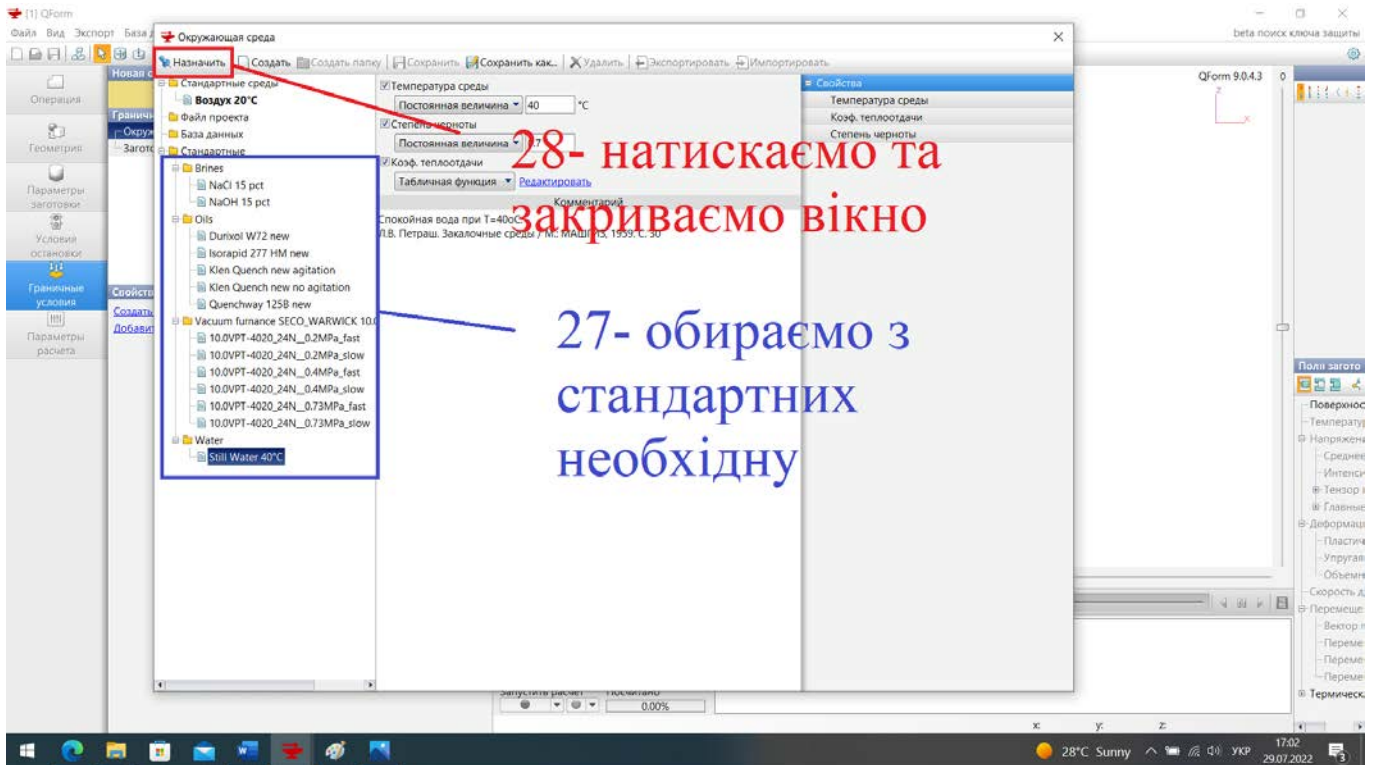
Продовження рисунка 3.3



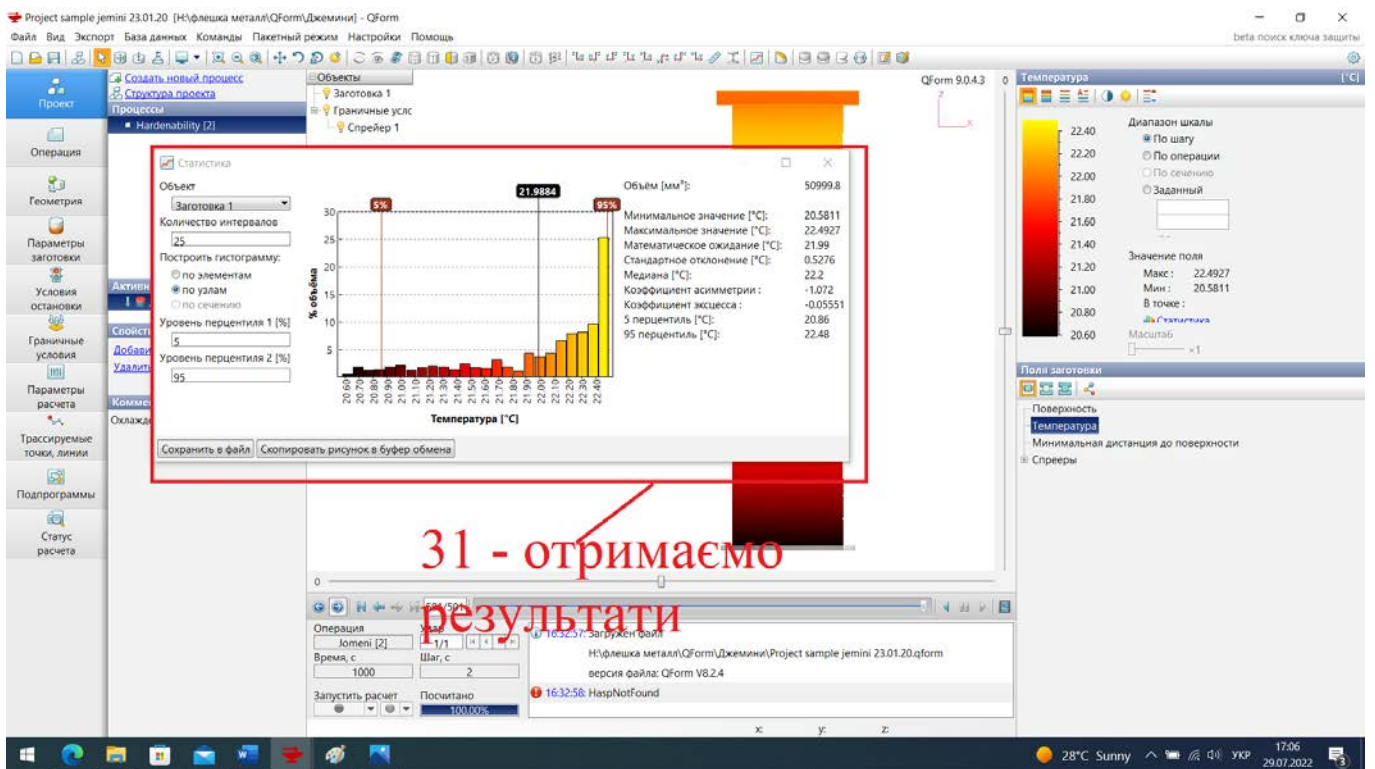
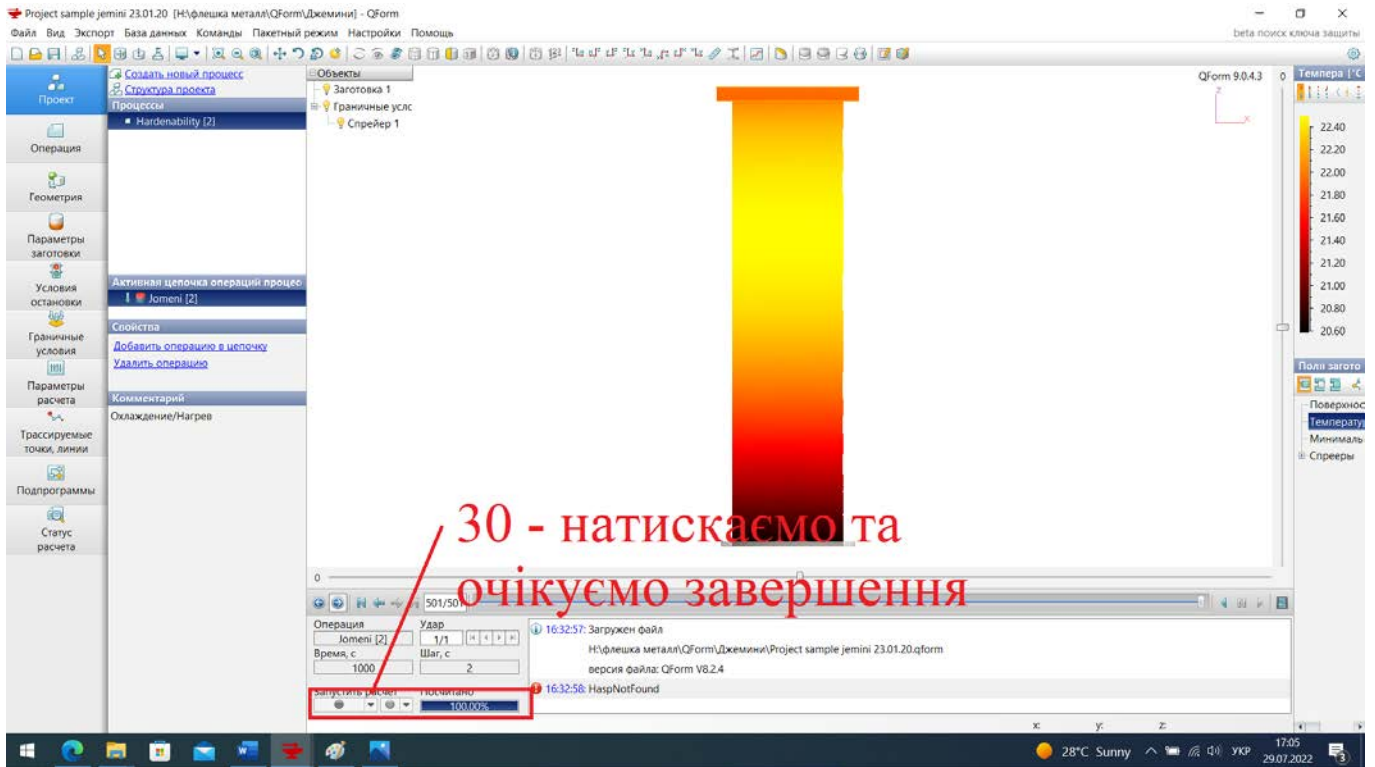
Продовження рисунка 3.3



Продовження рисунка 3.3



Продовження рисунка 3.3



Запитання для самоконтролю

1. Дати визначення поняттям модель та моделювання
2. Що включає поняття «аналіз даних», стосовно інформації з галузі матеріалознавства та технології термічної обробки металів?
3. Для чого застосовується спеціалізоване програмне забезпечення (СПЗ)?
4. На які групи можна розділити СПЗ?
5. Які спеціалізовані програмні забезпечення можуть бути використані в матеріалознавстві та термічній обробці металів?
6. Опишіть структурну схему проведення та отримання результатів математичного та комп'ютерного моделювання.
7. Що таке САД-модель?
8. Призначення програми ImageJ?
9. Якого розміру зображення застосовуються для аналізу в програмі ImageJ?
10. Яка кількість відтінків для 8-біт зображення в програмі ImageJ?
11. Інтерфейс робочого простору програми ImageJ?
12. Опишіть метод та послідовність дій у програмі ImageJ для проведення кількісного металографічного аналізу та структурно-фазового складу.
13. Опишіть метод та послідовність дій у програмі ImageJ для проведення гранулометричного аналізу.
14. Опишіть метод та послідовність дій у програмі ImageJ для проведення визначення розміру зерна.
15. Опишіть метод та послідовність дій у програмі ImageJ для визначення міжпластинчастої відстані перліту.
16. Що таке колоризація фото?
17. Опишіть метод аналізу поверхні зламів (фрактографія).
18. Призначення та сфера застосування програми GOM Correlate і для чого використовується?
19. Що таке цифрова кореляція зображень (DIC)?
20. Як проводяться випробування під час роботи з програмним пакетом GOM Correlate для фіксації деформації за методом DIC?
21. Опишіть поетапне застосування програмного пакету GOM Correlate.
22. Опишіть послідовність дій у пакету GOM Correlate для визначення характеристик при випробуванні на розтягування.

23. Призначення пакету Geomagic ControlX і для чого пакет використовується?
24. Призначення програми WebPlotDigitizer і для чого програма використовується.
25. Призначення програми JMatPRO?
26. Які властивості сталей і сплавів користувач може визначити за допомогою JMatPro?
27. Який інтерфейс являє собою програмне забезпечення JMatPro?
28. Які основні можливості є в JMatPro?
29. Для чого використовується програма QForm?
30. Від яких теплових ефектів залежить температурне поле?
31. Наведіть схему моделювання теплообміну під час гарячої пластичної деформації.
32. Які три види теплообміну ви знаєте?
33. Який вигляд має диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності, що використовується для моделювання температурного поля металовиробу у програмі QForm?
34. Які граничні умови виділяють для вирішення диференціального рівняння теплопровідності?
35. Для визначення яких граничних умов використовується закон Фур'є?
36. Для опису якого теплообміну використовується закон Ньютона-Ріхмана?
37. За якою формулою визначається щільність теплового потоку випромінювання на поверхні?
38. Що таке діаграма Вороного (осередки Вороного), призначення та сфера застосування?
39. На базі чого будується сітка осередків Вороного?
40. За допомогою якого методу моделюється процес теплообміну QForm?

ЛІТЕРАТУРА

1. Gom correlate. metiris. (2021, February 8). Retrieved July 30, 2022, from <https://metiris.ch/en/gom-correlate/>
2. Программное обеспечение 3D systems Geomagic Control X в ddm.lab. DDM.Lab. (n.d.). Retrieved July 30, 2022, from <https://www.ddmlab.ru/catalog/geomagic-control-x/>
3. Rohatgi, A. (n.d.). WebPlotDigitizer - extract data from plots, images, and maps. Retrieved July 30, 2022, from <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>
4. JMatPro®. Sente Software - JMatPro®. (n.d.). Retrieved July 30, 2022, from <https://www.sentesoftware.co.uk/jmatpro>
5. S. V. Adzhamskyy, H. A. Kononenko, and R. V. Podolskyi, Analysis of Structure after Heat Treatment of Inconel 718 Heat-Resistant Alloys Made by SLM-Technology, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 43, No. 7: 909–924 (2021)(in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.43.07.0909.
6. Dovgyy, B., Adjamskiy, S., Kononenko, A., Podolskyi R., & Pham, M.-S. (2021). Strengthening contributions and mechanical properties of precipitation-hardenable Inconel 718 fabricated by additive manufacturing. (In preparation)
7. QForm. (n.d.). Retrieved July 30, 2022, from <https://www.qform3d.com/>

Навчальне видання

Подольський Р. В.
Бабаченко О. І.
Кононенко Г. А.
Романова Н. С.
Сафронова А. О.
Клемешов Е. С.

**ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
В МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ ТА ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ**

Методичний посібник

Підписано до друку 03.09.2022. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.
Облік.-вид. арк. 3,82. Умов. друк. арк. 3,77. Замовлення № 95.

Український державний університет науки і технологій
49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2

Редакційно-видавничий відділ УДУНТ